



**Rui Pedro Rodrigues Matos**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Impressão 3D de suportes para bobinas supercondutoras produzidos em vários materiais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientadora: Anabela Monteiro Gonçalves Pronto, Prof. Doutora,  
Universidade Nova de Lisboa  
Co-orientador: Roberto André Henrique de Oliveira, Doutor, UNI-  
NOVA - Instituto de Desenvolvimento de Novas Tec-  
nologias

Júri



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Novembro, 2020**



Copyright © Rui Pedro Rodrigues Matos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





## AGRADECIMENTOS

Com este documento, dou como encerrada a fase final de uma etapa que representa um marco muito importante na minha vida, quer a nível pessoal, quer a nível académico. Contudo, a realização deste trabalho e o fecho deste ciclo não podia ter sido alcançado sem a ajuda de todos os que, directa ou indirectamente, contribuíram para o seu desenvolvimento e para a minha formação. Sendo a lista de pessoas a quem quero agradecer muito vasta, exprimo a todos o meu sincero e profundo agradecimento, não podendo no entanto, deixar de agradecer em especial a algumas pessoas.

À Professora Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto e ao Doutor Roberto André Henrique de Oliveira, orientadores científicos desta dissertação, por toda a disponibilidade, conhecimento, motivação e simpatia que me forneceram e transmitiram para a realização deste trabalho. É notório que são duas pessoas que gostam de ensinar e isso transparece em todas as aulas que dão e em todas as dúvidas que, sempre que é necessário, têm todo o prazer em tirar.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Universidade Nova, e a todas as instituições presentes no campus pelo acolhimento, formação e por todas as condições disponibilizadas para a realização da presente dissertação. Com realce para o FCT FabLab e os seus colaboradores pelo trabalho de preparação das amostras iniciais e pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas relacionadas com os ensaios experimentais.

A todos os colegas e amigos do curso de Electrotécnica, em especial, aos meus contemporâneos, Fábio Araújo, João Silveira, João Reis e António Santos pelas amizades criadas e por todo o vosso apoio; ao Ivo David, Leonardo Murta, Ricardo Guerreiro, Rui Lourenço e Filipe Vale pelas amizades construídas, pela convivência e cumplicidade que se criou durante todas as maratonas de estudo e em todas as festas e convívios e que tanto me deram motivação para a conclusão deste trabalho.

A todos os colegas e amigos da Comissão de Praxe de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, que me mostraram o verdadeiro sentido de tradição académica.

Ao meu pai Sérgio Manuel Matos e à minha mãe Fátima Maria Barbas Rodrigues, mentores da minha educação e formação, o meu especial agradecimento por tudo o que fizeram, e têm feito por mim. Nunca deixaram que me faltasse nada e sempre acreditaram no meu potencial e na minha capacidade de superar todos os obstáculos que me fossem impostos. À minha avó Felisbela, à minha Avó Teresinha, ao meu irmão Ricardo e à minha namorada Mariana por todo o carinho, apoio e motivação.

---

A todos, e por tudo, um verdadeiro obrigado.

## RESUMO

---

No mundo da atualidade existe uma exponencial procura e necessidade de uma produção de protótipos, moldes e ferramentas cada vez mais personalizada. Com a descoberta da tecnologia de impressão 3D advieram muitas facilidades para muitas indústrias e surgiram novos desafios para a ciência e engenharia.

Esta dissertação procura contribuir para otimizar os moldes usados para suportar uma bobina supercondutora. Os moldes são habitualmente manufaturados subtrativamente, sendo mais dispendioso e demorado de se obter. A manufatura subtrativa acarreta também desperdícios de material, provenientes da produção dos moldes. De modo a colaborar com Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT), no projeto 'T Loss', os moldes necessitam de apresentar certas características de resistência térmica e mecânica, em condições criogénicas. Desta forma foi feita uma pesquisa prévia de materiais que fossem passíveis de serem impressos e que suportassem uma temperatura de  $-196,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura é um dos parâmetros que permite que a fita supercondutora de alta temperatura (SAT) de segunda geração (2<sup>a</sup>G), atinja o estado de supercondutividade. Realizaram-se os ensaios laboratoriais para vários moldes de teste, até se atingir uma configuração de impressão ideal e uma posterior otimização estrutural.

O suporte prototipado mostrou-se equivalente ao suporte utilizado, relativamente à sua resistência térmica e mecânica, com destaque para a facilidade de produção de moldes através deste tipo de materiais, que por sua vez são de fácil acesso.

Apresenta-se também uma secção com simulações que ajudaram a extrapolar valores de pressão correspondente aos resultados obtidos. O mesmo software utilizado na simulação auxiliou na construção dos moldes em computador e na otimização geométrica dos mesmos.

### **Palavras-chave:**

Manufatura aditiva, Impressão 3D, Ácido polilático (PLA), Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), Tereftalato de polietileno modificado com glicol (PETG), Materiais Criogénicos

---



## ABSTRACT

---

In today's world there is an exponential demand and need for the production of prototypes, molds and tools that are increasingly personalized. With the discovery of 3D printing technology, many facilities for many industries have come about and new challenges have arisen for science and engineering.

This dissertation seeks to contribute to optimize the molds used to support a superconducting coil. Molds are usually manufactured subtractively, being more expensive and time-consuming to obtain. Subtractive manufacturing also causes waste of material from the production of molds. In order to collaborate with the Faculty of Science and Technology (FCT), in the 'T Loss' project, the molds need to present certain characteristics of thermal and mechanical resistance, under cryogenic conditions. In this way, a previous search was made for materials that could be printed and that could withstand a temperature of  $-196.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . This temperature is one of the parameters that allows the second generation (2G) high temperature superconducting tape (SAT) to reach the superconductivity state. Laboratory tests were carried out for several test molds, until an ideal printing configuration and subsequent structural optimization were achieved.

The prototyped support proved to be equivalent to the support used, regarding its thermal and mechanical resistance, with emphasis on the ease of producing molds using this type of materials, which in turn are easily accessible.

There is also a section with simulations that helped to extrapolate pressure values corresponding to the results obtained. The same software used in the simulation helped in the construction of computer molds and their geometric optimization.

**Keywords:** Additive manufacturing, 3D printing, Polylactic acid (PLA), Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), Glycol modified polyethylene terephthalate (PETG), Cryogenic materials

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>Siglas</b>	<b>xix</b>
<b>Símbolos</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução e Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Organização da Dissertação . . . . .	4
<b>2 Revisão Literária</b>	<b>5</b>
2.1 Impressão 3D - Manufatura aditiva . . . . .	5
2.1.1 Perspetiva histórica . . . . .	5
2.1.2 As diferentes técnicas e suas características . . . . .	7
2.1.3 Aplicações . . . . .	10
2.1.4 Impressão 3D para criogenia . . . . .	12
2.2 Materiais utilizados em ambientes criogénicos . . . . .	14
2.2.1 Propriedades dos materiais . . . . .	14
2.2.2 Celeron . . . . .	16
2.2.3 Fita SAT de 2ª geração . . . . .	18
2.2.4 Materiais de fácil acesso para impressão 3D . . . . .	19
2.2.5 Materiais de alto-desempenho . . . . .	23
2.3 Reflexão da revisão literária . . . . .	25
<b>3 Pré-análise e validação do protótipo</b>	<b>27</b>
3.1 Protocolo implementado . . . . .	27
3.2 Procedimento experimental . . . . .	32
3.3 Impressoras utilizadas e processo de impressão . . . . .	35
3.4 Resultados obtidos e discussão dos resultados . . . . .	37
3.5 Considerações finais . . . . .	42

<b>4</b>	<b>Construção do protótipo do suporte para bobinas supercondutoras</b>	<b>45</b>
4.1	Ensaio laboratorial do protótipo final . . . . .	45
4.2	Resultados experimentais . . . . .	48
4.2.1	Simulação das condições de teste com apoio de modelos numéricos	53
<b>5</b>	<b>Conclusões e perspectivas de desenvolvimento futuro</b>	<b>63</b>
5.1	Conclusões e considerações finais . . . . .	63
5.2	Perspetivas de desenvolvimento futuro . . . . .	64
	<b>Bibliografia</b>	<b>65</b>
	<b>Anexos</b>	<b>69</b>
<b>I</b>	<b>Anexos</b>	<b>69</b>



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Técnica aditiva SLA [7] . . . . .	6
2.2	Manufatura subtrativa (esquerda) e manufatura aditiva (direita) [8] . . . . .	6
2.3	Filamentos multicolor . . . . .	8
2.4	Peças produzidas com rugosidade . . . . .	8
2.5	Máquina <i>low-cost</i> , Ultimaker 2+ [11] . . . . .	9
2.6	A Fortus 900mc da Stratasys, com um programa <i>cloud-based</i> [12] . . . . .	9
2.7	Cronograma evolutivo das diferentes técnicas de impressão 3D [Adaptado de: [5]] . . . . .	10
2.8	Produção de um objeto em chocolate por FDM [16] . . . . .	11
2.9	Objeto com acabamento avançado (Lenovo) [17] . . . . .	11
2.10	"The Liberator" arma de fogo totalmente produzida através de impressão 3D	11
2.11	Ensaio laboratorial utilizando azoto liquido. Fonte : Elaborada pelo autor. . .	12
2.12	Suporte em Celeron atualmente utilizado . . . . .	16
2.13	Peças moldadas em Celeron [22] . . . . .	17
2.14	Chapas em celeron [22] . . . . .	17
2.15	Adaptação da figurada composição da fita supercondutora 2G fabricada pela SuperPower [23] . . . . .	18
2.16	Estruturas químicas dos monómeros de ABS . . . . .	20
2.17	Chapas e barras em PEI [35] . . . . .	24
2.18	Bocais tabágicos em PEI [36] . . . . .	24
2.19	Barras em PEEK [40] . . . . .	25
2.20	Válvulas em PEEK natural [40] . . . . .	25
3.1	Barra desenhada no ANSYS . . . . .	28
3.2	Cilindro desenhado no ANSYS . . . . .	28
3.3	Padrão gyroid . . . . .	28
3.4	Padrão grid . . . . .	28
3.5	Mesa de impressão . . . . .	29
3.6	Mesa de impressão vista de cima . . . . .	29
3.7	Os 3 preenchimentos em cilindros verticais com padrão gyroid e grid . . . . .	29
3.8	Várias geometrias, padrões e preenchimentos . . . . .	29

3.9	Variação da Temperatura [°C] em função do Tempo [minutos] do material selecionado . . . . .	30
3.10	Termómetro Fluke 287 [43] . . . . .	31
3.11	Variação da Temperatura [°C] em função do Tempo [minutos], protocolo aplicado nos ensaios laboratoriais . . . . .	32
3.12	Bancada de ensaio . . . . .	33
3.13	Pontos de medição em cilindros . . . . .	34
3.14	Pontos de medição em barras . . . . .	34
3.15	Impressora Ultimaker 2+ [11] . . . . .	35
3.16	Impressora Ender 3 [44] . . . . .	35
3.17	Impressão na horizontal . . . . .	36
3.18	Impressão na vertical . . . . .	36
3.19	Algumas das amostras impressas em PETG . . . . .	37
3.20	Algumas das amostras impressas em PLA . . . . .	39
3.21	Algumas das amostras impressas em ABS . . . . .	41
3.22	Peça em ABS fissurada . . . . .	43
4.1	Núcleo de ferro . . . . .	46
4.2	Núcleo de ferro com três crióstatos . . . . .	46
4.3	Molde projetado no ANSYS . . . . .	46
4.4	Primeiro molde final impresso . . . . .	46
4.5	Pontos de medição do molde (vista de cima) . . . . .	47
4.6	Pontos de medição do molde (interior e exterior) . . . . .	47
4.7	Pontos de medição, da cava de encaixe da fita, do molde . . . . .	47
4.8	Medição da distância entre os pontos estipulados com o auxílio de um paquímetro . . . . .	47
4.9	Os três moldes sem abertura . . . . .	48
4.10	Os três moldes com abertura . . . . .	48
4.11	Primeiro molde final com defeito de impressão na sua base . . . . .	49
4.12	Um dos moldes sem abertura . . . . .	50
4.13	Um dos moldes com abertura . . . . .	52
4.14	Configuração e composição da máquina de solda em conjunto com o molde operacional impresso . . . . .	52
4.15	Simulação de um molde com 1 milímetro de espessura na região assinalada . . . . .	54
4.16	Molde com geometria inicial . . . . .	54
4.17	Molde com geometria deformada, após aplicada uma pressão . . . . .	54
4.18	Variação da Deformação [mm], do molde de 1 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Pressão [MPa] . . . . .	55
4.19	Variação da Deformação [mm] do molde, de 1 mm de espessura da cava de encaixe da fita em função da Temperatura [°C] . . . . .	56
4.20	Secção da metade do molde com um milímetro de espessura . . . . .	57

4.21	Secção da metade do molde com dois milímetro de espessura . . . . .	57
4.22	Secção da metade do molde com 3 mm de espessura . . . . .	58
4.23	Otimização geométrica simulada, com remoção de material até 10% . . . . .	58
4.24	Otimização geométrica, com vista aproximada . . . . .	59
4.25	Variação da Deformação [mm], do molde de 2 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Pressão [MPa] . . . . .	59
4.26	Variação da Deformação [mm], do molde de 2 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Temperatura [°C] . . . . .	60
4.27	Variação da Deformação [mm], do molde de 3 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Pressão [MPa] . . . . .	60
4.28	Variação da Deformação [mm], do molde de 3 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Temperatura [°C] . . . . .	61
4.29	Parede interior do molde com 1 mm de espessura da cava . . . . .	61
4.30	Parede interior do molde com 2 mm de espessura da cava . . . . .	62
4.31	Parede interior do molde com 3 mm de espessura da cava . . . . .	62



## LISTA DE TABELAS

2.1	Algumas tecnologias de impressão 3D [6]	7
2.2	Propriedades mecânicas do Celeron	18
2.3	Propriedades físicas e mecânicas da fita YBCO.	19
2.4	Propriedades mecânicas do ABS	20
2.5	Propriedades mecânicas do PLA	21
2.6	Propriedades mecânicas do PETG	22
2.7	Propriedades mecânicas do PEI	23
2.8	Propriedades mecânicas do PEEK	24
3.1	Enumeração dos moldes primitivos	34
3.2	Comparação de padrões e preenchimentos entre barras de PETG	38
3.3	Comparação de padrões e preenchimentos entre cilindros de PETG	38
3.4	Comparação de padrões e preenchimentos entre barras de PLA	40
3.5	Comparação de padrões e preenchimentos entre cilindros de PLA	40
3.6	Comparação de padrões e preenchimentos entre barras de ABS	41
3.7	Comparação de padrões e preenchimentos entre cilindros de ABS	42
3.8	Percentagens de contração de cada material	43
4.1	Medições iniciais do primeiro protótipo	48
4.2	Medições e percentagens de contração, após duas horas de submersão em azoto líquido	49
4.3	Medições iniciais dos três moldes sem abertura	50
4.4	Medições e percentagens de contração, após duas horas e trinta minutos de submersão em azoto líquido (#1,#2 e #3)	51
4.5	Medições iniciais dos três moldes com abertura	53
4.6	Medições e percentagens de contração, após duas horas e trinta minutos (#4,#5 e #6)	53



## SIGLAS

**3D** Tridimensional

**ABS** Acrilonitrila-Butadieno-Estireno ou *Acrylonitrile-Butadiene-Styrene*

**C.E.F** Cava de encaixe da fita

**CAD** Desenho assistido por computador ou *Computer Aided Design*

**CET** Coeficiente de Expansão/contração Térmica ou *CTE Coefficient of Thermal Expansion/contraction*

**FDM** Modelagem de Deposição Fundida ou *Fused Deposition Modeling*

**Fita SAT 2G** Fita Supercondutora de Alta Temperatura de Segunda Geração

**NASA** National Aeronautics and Space Administration

**PEEK** Éter de poliéter de cetona ou *Polyether ether ketone*

**PEI** Polieterimida ou *Polyetherimide*, mais conhecido como Ultem

**PEKK** Poliéter-cetone-cetona ou *Polyetherketoneketone*

**PET** Polietileno tereftalato ou *Polyethylene terephthalate*

**PETG** Tereftalato de polietileno modificado com glicol ou *Polyethylene terephthalate glycol-modified*

**PLA** Ácido polilático ou *Polylactic acid*

**PU** Poliuretano ou *Polyurethane*

**SLA** Estereolitografia ou *Stereolithography*

**SLM** Fusão a laser ou *Selective Laser Melting*

**SLS** Sinterização a laser ou *Selective Laser Sintering*

**UV** Radiação ultravioleta

**YBCO** Designação genérica dos supercondutores de composição química  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , onde  $\delta$  é o teor de oxigénio





## SÍMBOLOS

$\alpha$  coeficiente de contração linear do material  $[\text{°C}^{-1}]$

$c_p$  capacidade térmica volumétrica  $\left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{°C}}\right]$

$\Delta l$  variação do comprimento [mm]

$\Delta T$  variação de temperatura [°C]

$I$  inércia térmica  $[\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}]$

$l_0$  comprimento inicial [mm]

$\lambda$  condutibilidade térmica  $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}}\right]$



## INTRODUÇÃO

*Neste capítulo, descreve-se a base do problema em questão, realçando a importância do desenvolvimento deste trabalho. Posteriormente, serão apresentados os objetivos, juntamente com a organização da dissertação.*

### 1.1 Introdução e Motivação

A ideia de que para desenhar e manufaturar um novo produto demora um longo período de tempo, já não se verifica nos dias de hoje. Não existe necessidade de recorrer a entidades fabricantes de ferramentas e moldes e de estar dependente de um vasto número de aparelhos antes de começar uma nova produção. Isto, devido a uma nova versão da revolução industrial conhecida como a *Maker Revolution*. Em que o principal impulsionador desta revolução foi o desenvolvimento de um novo método de fabricação automática de um modelo tridimensional feito em plástico, a manufatura aditiva ou impressão 3D. O desenvolvimento deste método foi bastante vantajoso para a indústria, uma vez que com ela se pode arquitetar, rapidamente, uma peça com uma geometria complexa, dispondo de uma vasta gama de materiais e cores.[1]

A tecnologia de impressão tridimensional foi desenvolvida há mais de 25 anos nos Estados Unidos. Consistia na produção de um objeto através da adição de camadas, utilizando uma cabeça extrusora que imprime o material fundido a um fluxo e temperatura controlados. Em certas impressoras 3D, a cabeça tem a habilidade de se mover no plano XY e a mesa / cama de impressão move-se no eixo do Z (como é o caso da impressora 3D - Ender 5), tudo sob controlo computacional, permitindo a manufatura de formas complexas [2]. Em alternativa, existem impressoras 3D em que apenas a cabeça se move na impressão de um objeto (como é o caso da impressora 3D - Ender 3). [3] A partir dos anos 60, a NASA interessou-se pelo estudo dos plásticos em ambientes criogénicos,

procurando saber o comportamento dos mesmos em temperaturas abaixo dos  $-150^{\circ}\text{C}$ , com intuito de melhorar vedações, bombas, válvulas e rolamentos nas suas naves espaciais[4]. Com uma contínua pesquisa sobre o assunto, os plásticos estão agora presentes em áreas como a aeroespacial, passando pelas forças armadas até às aplicações biomédicas, o plástico está presente em todo o lado e é usado também em ambientes criogénicos. A tecnologia criogénica tem presenciado uma grande evolução nos últimos anos e, especialmente, as propriedades criogénicas de polímeros têm sido alvo de interesse para áreas como o espaço, supercondutividade, magnetismo e eletricidade.

Com o crescente interesse na supercondutividade e a necessidade de realizar diversas pesquisas e ensaios laboratoriais em ambientes criogénicos, surge também a necessidade de substituir algumas ferramentas anteriormente utilizadas em ensaios laboratoriais e aplicações, por plásticos mais baratos e fáceis de obter. Esta dissertação foca-se na pesquisa de um material passível de ser impresso e que sirva de suporte para uma bobina supercondutora. Um dos materiais atualmente utilizado é o Celeron. A produção deste molde provém de uma manufatura subtrativa, sendo esta mais dispendiosa, mais demorada e com acesso a uma geometria mais restrita. Serão apresentados alguns dos materiais que possam ser impressos e que possuam alta resistência térmica e mecânica e baixos coeficientes de expansão. linear[4] Com uma performance igual ou superior ao atual Celeron.

Através desta pesquisa e uma análise termo-mecânica dos polímeros de teste, será possível reduzir os custos e os desperdícios e aumentar a rapidez de prototipagem, assim como a facilidade de produção.

É de realçar que os moldes produzidos nesta dissertação, servirão de teste para se encontrar uma configuração estrutural ideal, de um molde produzido por uma impressora 3D. Desta forma, irão contribuir para otimizar o processo do estudo 'tLoss', que conta com a participação do Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias (UNINOVA) e com a colaboração do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da FCT, e cuja referência é PTDC/EEI-EEE/32508/2017LISBOA-01-0145-FEDER-032508.

## 1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo a impressão de um molde que sirva de suporte para uma bobina supercondutora, analisando os esforços mecânicos do material e do molde utilizado. Implica a construção e simulação de vários protótipos para, posteriormente, serem caracterizados em ambiente criogénico, de modo a quantificar as suas propriedades térmicas e mecânicas e verificar se se adequam à respetiva aplicação de suporte.

Os objetivos necessários a cumprir serão:

- Recolha das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais utilizados por impressoras 3D.
- Construção dos moldes utilizando o software ANSYS 2020 R2 (Student).
- Aplicação de um método de medição de contrações (utilizando paquímetro e micrómetros) para medir a contração, e um termómetro Fluke 287, para controlo da temperatura.
- Implementação de um protocolo para uma igual análise de todos os moldes em questão.
- Ensaaios laboratoriais para a medição de esforços, tanto axiais como radiais, a que os vários materiais de suportes estão sujeitos numa situação de uma rápida alteração de temperatura (começando nos 20 °C e atingindo os -196,15 °C).
- Análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e comparação com as propriedades térmicas e mecânicas das diversas topologias e materiais utilizados (suporte).
- Escolha do material e geometria adequados e construção do protótipo final.
- Otimização estrutural e geométrica do molde escolhido.

### 1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação organiza-se em 5 capítulos:

- **Capítulo 1 - Introdução**

Este capítulo sumariza os objetivos pretendidos e a motivação. Descrevem-se as razões que levaram à pertinência e relevância desta dissertação, bem como as facilidades e vantagens que advêm da mesma.

- **Capítulo 2 - Revisão da literatura**

No presente capítulo foi feita uma abordagem aos temas inerentes a esta dissertação, referindo a manufatura aditiva, materiais utilizados em ambientes criogénicos e as diversas propriedades dos materiais.

- **Capítulo 3 - Pré-análise e validação do protótipo**

É aqui, protocolado todo o procedimento executado nos ensaios laboratoriais iniciais, assim como, são apresentados os resultados obtidos e as considerações intermédias a que se chegaram, para se avançar com uma configuração ideal do molde prototipado. Foi também feita uma referência às máquinas utilizadas, durante o processo de impressão, e alguns dos problemas que advieram desta tecnologia.

- **Capítulo 4 - Construção do protótipo do suporte para bobinas supercondutoras**

São descritos: todos os protocolos utilizados na escolha de um molde ideal e os ensaios laboratoriais dos moldes finais e dos otimizados estruturalmente e geometricamente. Neste capítulo, é explorado o software Discovery Live 2020 R2 (Student), que é um software de simulações pertencente ao pacote ANSYS.

- **Capítulo 5 - Conclusões e perspectivas de desenvolvimento futuro**

Por fim, no capítulo conclusivo, apresentam-se todas as reflexões e considerações finais relevantes, e algumas propostas de trabalhos futuros que seria interessante desenvolver.

## REVISÃO LITERÁRIA

*Neste capítulo, serão abordados alguns conceitos e tópicos que mais contribuem para melhor enquadrar e contextualizar o leitor da presente dissertação. Primeiramente, é apresentado, numa perspectiva histórica, uma breve descrição da evolução da manufatura aditiva, assim como algumas das suas aplicações em criogenia. Seguindo-se de dois subcapítulos, um explicando os cuidados a ter com a escolha do material e outro referente à geometria a ser aplicada nesta situação.*

### 2.1 Impressão 3D - Manufatura aditiva

#### 2.1.1 Perspetiva histórica

A manufatura aditiva ou impressão 3D são duas terminologias que se referem a um procedimento tecnológico que transforma um arquivo digital em objetos sólidos, através de uma técnica de sobreposição de camadas. Estes objetos são primeiro desenhados utilizando um computador e um software CAD (computer aided design), ou através de um 3D scanner, e são então fabricados por uma impressora 3D. Esta divide o modelo recebido no arquivo digital em camadas transversais que imprime, camada por camada, até ser obtida a peça desejada.

Em 1984, foi desenvolvida por Chuck Hull a primeira técnica de se fabricar um protótipo a partir de um ficheiro digital, à qual deu o nome de Estereolitografia (SLA) e foi patenteada em 1986. Esta técnica utiliza uma resina que solidifica na presença de raios ultravioleta (UV). Assim, a radiação UV é constantemente emitida e direcionada para as sucessivas camadas que devem ser solidificadas, de modo a que a construção seja efetuada na vertical. [5]

Após a descoberta e patente da SLA, Hull entra nos ramos da investigação e do mercado através da 3D systems, empresa que fundou. A comercialização daquilo que era a

prototipagem rápida, captou um interesse a nível global na época, pois passara a ser um tipo de manufatura incomum: a manufatura aditiva. [6]

A manufatura subtrativa, mais comum, é um processo onde a partir de um bloco de matéria prima, se remove, parcialmente, material deste bloco. Alguns exemplos de processo de manufatura subtrativa são o torneamento, o fresamento, a retificação, a eletro-erosão a fio ou a eletro-erosão por penetração, entre outros.

Para além da técnica aditiva não subtrair material, dispensa de ferramentas para produzir, utilizando apenas a própria impressora. Na figura 2.1, está apresentada a técnica de impressão cunhada como Estereolitografia, em que se observa a interação da resina com o foco de feixe do laser.

Na figura 2.2, diferencia-se a fabricação subtrativa em relação à fabricação aditiva.

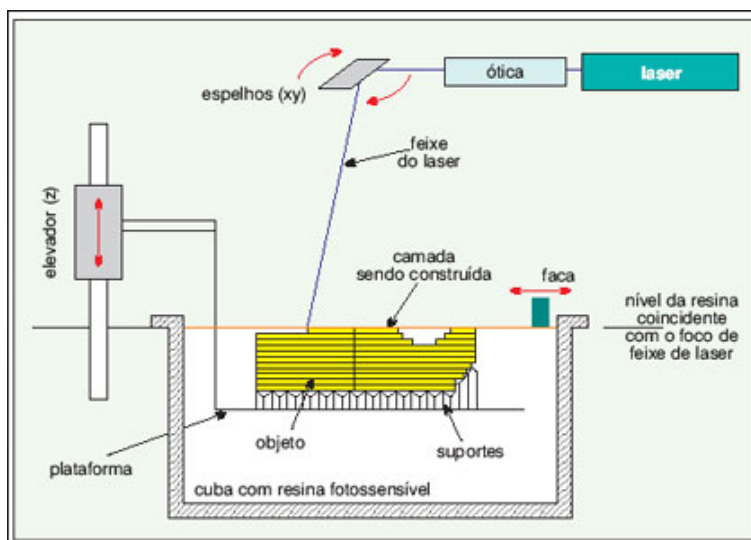


Figura 2.1: Técnica aditiva SLA [7]

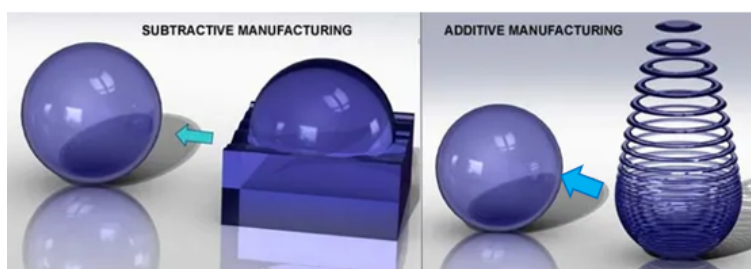


Figura 2.2: Manufatura subtrativa (esquerda) e manufatura aditiva (direita) [8]

Todos estes métodos de impressão 3D possuem a capacidade de produzir protótipos que por meio de fabricação subtrativa não seriam possíveis. Além de que não necessitam de moldes pré-fabricados, ferramentas ou recursos intermediários necessários na produção em massa, representando, assim, uma opção economicamente viável.

A procura de soluções que utilizam materiais mais leves e de rápida prototipagem



para aplicações supercondutoras ainda não foram muito desenvolvidas, uma vez que precisam de usar materiais de baixo peso, em especial plásticos, resinas e polímeros. Apenas um número limitado desses materiais como Poliamida (PA), PEEK, PEKK, PU, entre outros; são qualificados para temperaturas criogénicas, mas existe um grande número de candidatos com bom potencial e necessidade de serem investigados [9]. Plásticos, resinas e polímeros têm a desvantagem de ter uma maior contração térmica comparando com metais e supercondutores, o que leva a uma incompatibilidade térmica dos compósitos após o arrefecimento a temperaturas criogénicas. Fibra de carbono e fibra vidro reforçada são uns dos materiais usados para corrigir as contrações térmicas de metais, ligas e compósitos, melhorando as propriedades mecânicas. Até então, os termoplásticos produzidos por impressoras 3D, não eram vistos como materiais para aplicações criogénicas, mas estes demonstram ser candidatos preferenciais para peças e construções complexas utilizadas em ambientes criogénicos [9].

### 2.1.2 As diferentes técnicas e suas características

A técnica pioneira de impressão 3D foi a SLA, nos anos 80. Cinco anos depois, Scott Crump patenteia a chamada técnica Fused Deposition Modeling (FDM) ou modelagem de deposição fundida. Com a contínua pesquisa de novas técnicas surgiram outras como a sinterização a laser de metal direto ou Direct Metal Laser Sintering (DMLS), a sinterização a laser ou Selective Laser Sintering (SLS), fusão a laser ou Selective Laser Melting (SLM), Polyjet, entre outras técnicas que ainda estão em estudo e não dispõem de grande informação [6].

Na tabela 2.1 apresenta-se uma síntese das técnicas mais usadas de impressão tridimensional.

Tabela 2.1: Algumas tecnologias de impressão 3D [6]

Tipo de técnica	Tecnologia	Materiais
Polimerização fotossensível	SLA -Estereolitografia	Foto polímeros e resinas
Extrusão	FDM - Deposição de filamento fundido	Termoplásticos, misturas e metais eutéticos
Granular	SLS - Sinterização a laser	Ligas metálicas: titânio, alumínio, aço inoxidável
Granular	SLM - Fusão a laser	Termoplásticos, pós metálicos e cerâmicos
Polimerização	Polyjet	Resinas e foto polímeros combinados

Apesar de algumas diferenças, estas técnicas têm algo em comum, a característica de produzirem diretamente a partir de um ficheiro de computador, o que reduz bastante

os custos de produção, transporte e armazenamento de materiais, uma vez que se um produto for necessário é produzido no local e hora desejado.

Cada técnica tem a sua vantagem e deve ser adequada ao propósito e ao investimento disponível. Duas grandes diferenças da manufatura subtrativa são os materiais que se podem usar e a velocidade com que são fabricados os objetos.

A *Fused Deposition Modeling*, ou em português, deposição de filamento fundido - neste caso o termoplástico - utiliza um filamento de termoplástico orientado até um cabeçote de extrusão que será aquecido até o seu ponto de fusão e então depositados camada sobre camada para a criação de um modelo tridimensional. Pelo fato de usar termoplásticos, a tecnologia FDM é usada com frequência para construir geometrias complexas e componentes funcionais. Permite ainda a impressão multicolor, uma vez que possuem uma ou mais extrusoras. Por outro lado, a impressão 3D via FDM apresenta um aspecto rugoso visível a olho nu, sendo isto um fator negativo, se o produto final necessitar de um melhor acabamento. Destacou-se esta técnica, uma vez que foi a utilizada na produção dos moldes de teste e dos protótipos finais.

Na figura 2.3, é possível observar as várias cores de filamentos disponíveis e na figura 2.4 a rugosidade e falta de acabamento que, algumas técnicas de impressão, juntamente com o tipo de material, podem proporcionar.



Figura 2.3: Filamentos multicolor



Figura 2.4: Peças produzidas com rugosidade

Os filamentos e materiais para as impressoras 3D começaram também a captar o interesse de grandes empresas de químicos como a DuPont e a Eastman, que produziam materiais para máquinas low-cost[10], exemplo de uma na figura 2.5. Aquando do aparecimento destas máquinas, por volta de 2011 e 2012, estavam apenas disponíveis os plásticos: Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e Ácido Polilático (PLA). Em 2016 uma ampla variedade de filamentos foi possível de imprimir, em máquinas acessíveis ao público geral, incluindo:

- Termoplástico Poliuretano ou *Thermoplastic polyurethane*
- Poliamida ou *Polyamide*
- Polietileno ou *Polyethylene terephthalate*

- Poliestireno de alto impacto ou *High-impact polystyrene*
- Policarbonato ou *Polycarbonate*
- Acrílico-estireno -- acrilonitrila ou *Acrylic-styrene--acrylonitrile*
- Polipropileno ou *Polypropylene*
- Uma larga gama de compósitos únicos como a madeira, metal, fibra de carbono e termoplásticos granulados
- Filamentos produzidos a partir de materiais reciclados como moagens de café e cânhamo.



Figura 2.5: Máquina *low-cost*, Ultimaker 2+ [11]



Figura 2.6: A Fortus 900mc da Stratasys, com um programa *cloud-based* [12]

Máquinas mais recentes que utilizam a técnica FDM tornaram possível imprimir plásticos para uso aeroespacial assim como, o Polieterimida (PEI), mais conhecido como Ultem e o Éter de poliéter de cetona (PEEK). Era complicada a impressão destes materiais, dado que só eram possíveis de imprimir com máquinas da Stratasys, presente na figura 2.6. Isto porque eram necessárias altas temperaturas (entre 350 °C e 400 °C) para realizar a extrusão e uma temperatura ambiente relativamente alta também (cerca de 180°C). Em 2016, apareceram três novos fabricantes que vendiam máquinas capazes de imprimir utilizando os materiais variantes de PEI ou PEEK, que são a 3ntr, Roboze e a Indmtec. [13]

A SLS (EUA) e SLM (Alemanha) são muito semelhantes, uma vez que utilizam um laser de CO<sub>2</sub> de alta potência para fundir os seus materiais que se encontram em pó (estado granulado). Estas técnicas produzem modelos com elevada resistência à ruptura e boa resistência ao calor e à corrosão química. A particularidade desta técnica é que os modelos são produzidos em reservatórios de pó do próprio material a ser produzido, não sendo possível fabricar um molde com dois materiais diferenciados e, em relação à

escolha de cor, as hipóteses são reduzidas, dado que o material é sintetizado na mesma cor do pó da matéria-prima.

Na figura 2.7, é apresentado cronologicamente a evolução da impressão 3D com o aparecimento de novas técnicas.

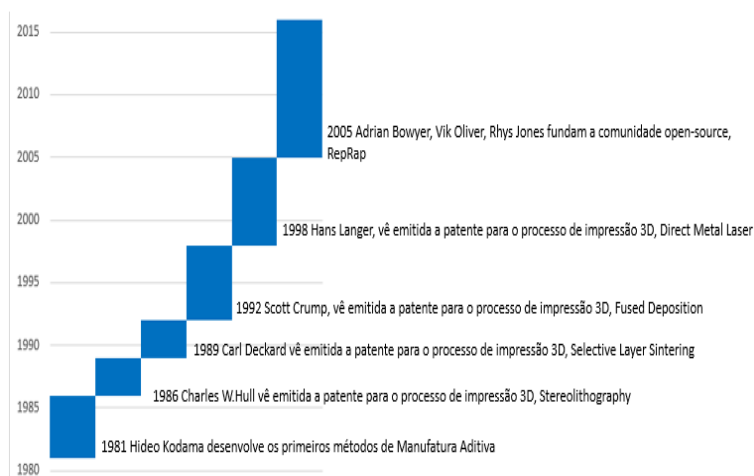


Figura 2.7: Cronograma evolutivo das diferentes técnicas de impressão 3D [Adaptado de: [5]]

### 2.1.3 Aplicações

Com o tempo, o uso da impressora 3D foi crescendo no mercado o que possibilitou um maior desenvolvimento de todo o tipo de modelos, que passaram a oferecer produtos de várias cores e geometrias complexas, objetos em alta definição/acabamento e utilização de diferentes materiais.

Sem dúvidas que esse avanço foi positivo em diversas áreas, especialmente para a medicina. A elevada capacidade de personalização de próteses e outros aparelhos fabricados em tamanhos pré-estabelecidos representa significativos avanços em relação às tecnologias convencionais. Para além de acelerarem os processos de produção e testes, são uma opção economicamente viável e dão mais oportunidades a quem necessita. Outra conquista na área médica é a possibilidade de imprimir tecidos humanos, que poderão ser utilizados em transplantes. Esse tipo de impressão já se mostrou eficiente em reproduzir ossos, músculos e estruturas do ouvido [14]. Para além de várias conquistas na área da medicina, outra das aplicações podrá ser a possibilidade de diminuir custos na produção de sapatos, roupas e outras peças de vestuário e acessórios. Pode também ser ainda mais impactante no nosso quotidiano e ser utilizado na produção de carros e até alimentos.

Esta tecnologia ganharia um papel importante no setor alimentar, se tivesse a capacidade de reproduzir receitas com a perícia de um chefe de cozinha conceituado. Barilla Company com a colaboração da TNO, uma empresa holandesa de investigação científica, trabalharam numa impressora 3D que imprimisse massa (esparguete já cozinhado)[15].

O objetivo deste projeto era criar arquivos digitais para os clientes adquirirem, de modo a que, quando frequentassem um restaurante teriam apenas de apresentar o arquivo e a sua refeição seria impressa na sua mesa. Um dos destaques nesta área é o fabrico de chocolates. A ChocoBot utiliza uma técnica semelhante a FDM, permitindo a dispensa de moldes de plástico pré-fabricados e formando camada a camada o produto final desejado[15].

A figura 2.8 apresenta a produção de uns sapatos, em chocolate e por camadas; e na figura 2.9 um acabamento atingido pela Lenovo com a sua impressora 3D, também em chocolate (direita).



Figura 2.8: Produção de um objeto em chocolate por FDM [16]



Figura 2.9: Objeto com acabamento avançado (Lenovo) [17]

Embora todas estas aplicações sejam benéficas até ao momento, a grande versatilidade desta arte tecnológica admite impressões que podem causar polémica, como a impressão de armas de fogo funcionais e não detetáveis por aparelhos de segurança, como se ilustra na figura 2.10



Figura 2.10: "The Liberator" arma de fogo totalmente produzida através de impressão 3D

### 2.1.4 Impressão 3D para criogenia

Criogenia estuda a produção e o comportamento de materiais e aplicações a muito baixas temperaturas. Um ambiente é considerado criogénico se manifestar temperaturas, normalmente, abaixo dos  $-150^{\circ}\text{C}$ . Muitas indústrias modernas utilizam a criogenia em muitas aplicações. Entre estas aplicações estão os combustíveis criogénicos, hardware de naves espaciais, máquinas para aplicações médicas e de biociências, incluindo ressonância magnética (RM), aceleradores de partículas e magnetos supercondutores. A figura 2.11 foi retirada no âmbito de um ensaio laboratorial utilizando azoto líquido.



Figura 2.11: Ensaio laboratorial utilizando azoto liquido. Fonte : Elaborada pelo autor.

De acordo com a Curbell Plastics, existe uma variada oferta no mercado, no que respeita a plásticos de grande performance em regimes extremos de temperaturas, incluindo o Ultem, Radel, PEEK e DuPont Vespel. Apenas o Ultem e o PEEK são passíveis de serem impressos. A engenharia permitiu a produção de polímeros de alto desempenho, apresentando estas características, enquanto expostos a ambientes de muito baixas ou elevadas temperaturas:

- Baixa ou elevada condutividade térmica
- Baixo coeficiente de expansão térmica
- Excelentes propriedades de revestimento/ anti-desgaste
- Boas características de selagem
- Estabilidade térmica duradoura

- Resistência à deformação
- Capacidade de manter as propriedades mecânicas às baixas e altas temperaturas
- Resistência a água quente e vapor de água

Quando a intenção é fabricar componentes para uso em condições criogênicas, é preciso selecionar um plástico que exiba um comportamento dúctil a baixas temperaturas e tenha um baixo coeficiente de expansão térmica. Para aplicações a baixas temperaturas onde a transferência de calor é uma preocupação, então é também importante selecionar um plástico com a condutividade térmica adequada [4].



## 2.2 Materiais utilizados em ambientes criogénicos

O plástico consegue ter uma performance bastante boa em ambiente criogénico, desde de que os produtos concebidos a partir desse material, estejam previamente formatados para o mesmo tipo de ambiente, na altura da sua criação.

### 2.2.1 Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais estão relacionadas com a natureza das suas ligações que existem entre átomos. Não importa qual o material em questão, sempre que sujeito a temperaturas criogénicas, torna-se mais duro, rígido e quebradiço.

Cada material apresenta propriedades próprias: dureza, fragilidade, resistência, elasticidade, impermeabilidade, condução térmica, são alguns exemplos.

As propriedades físicas descrevem o comportamento do material em todas as condições do processo de fabrico e de utilização, sendo estas divididas em propriedades mecânicas, térmicas e elétricas.

As **propriedades mecânicas** determinam a capacidade que o material tem para ceder ou resistir aos esforços que lhe são impostos. Essa capacidade é bastante importante durante todo o processo de fabricação e aplicação, o que torna este conjunto de propriedades, o mais relevante para a escolha de uma matéria-prima.

No que toca às propriedades mecânicas, convém salientar a resistência mecânica. Esta característica define se o material é resistente a determinados tipos de esforços, como a flexão, tração e a compressão [18].

A elasticidade representa a capacidade que o material possui de se deformar quando submetido a um esforço, e de regressar à sua forma original quando o esforço termina. Um dos grandes exemplos de um material com grande elasticidade é a borracha, embora alguns plásticos apresentem essa característica também. Podemos pensar também no aço, que apresenta essa propriedade ilustrada na produção de molas e suspensões. Outra das propriedades que se enquadra no âmbito mecânico é a ductilidade. Esta define a capacidade que o material deve ter de se deformar quando submetido a um esforço, e de manter essa deformação quando o esforço acaba. Esta característica deve ser tomada em conta quando é exigida conformação mecânica em diversos processos de fabrico.

A dureza classifica a resistência do material à deformação plástica permanente, à penetração e ao desgaste. Normalmente, materiais duros apresentam-se, também como materiais frágeis. Os plásticos já são, por natureza, mais propícios a quebrar que muitos metais, sendo por isso necessário ter algumas precauções quando usamos plástico num projeto de âmbito criogénico, em que os materiais são sujeitos a grandes pressões ou impactos.[19] É possível modificar os polímeros de modo a que estes endureçam, mas é também importante mencionar que nem todo o processo de endurecimento funciona corretamente em ambientes criogénicos. A adulteração praticada que deverá melhorar



a dureza do material à temperatura ambiente, pode não melhorar a sua dureza a temperaturas criogénicas. Por exemplo, o preenchimento do *Polytetrafluoroethylene* (PTFE) com grafite, torna-o mais duro à temperatura ambiente, mas não é a melhor escolha para ambientes criogénicos. Uma vez que os plásticos são mais leves e menos dispendiosos que outros materiais, tem existido uma contínua pesquisa e procura do plástico perfeito para criogenia.

A fragilidade pertence também ao conjunto de propriedades mecânicas em que determina que o material possui baixa resistência às tensões aplicadas. Um dos grandes exemplos é o vidro, que é duro e bastante frágil, pois sofre uma fratura rápida, sem deformação plástica.

As **propriedades térmicas** determinam o comportamento dos materiais quando são submetidos a variações de temperatura, tanto no seu processo de fabricação quanto na sua utilização.

A dilatação térmica é uma característica que faz com que os materiais aumentem o seu volume quando ocorre uma elevação de temperatura ou diminuam quando se reduz a temperatura. Necessariamente, esta propriedade tem grande ênfase na área de construção de grandes estruturas, em que estas são contruídas com pequenas folgas, permitindo que o material se molde nos dias de muito calor. Por outro lado, analisando as áreas aeroespaciais e ambientes de criogenia, é ideal que o coeficiente de expansão/contração térmica dos materiais seja reduzido. Um dos problemas que deve ser realçado e tomado em consideração, quando se produzem materiais para uso acoplado com outros materiais, como metal, é o coeficiente de expansão térmica (CTE) dos polímeros. Se uma peça de plástico e a outra peça não contraírem ao mesmo ritmo quando arrefecidas, pode tornar a aplicação disfuncional. Este é um problema comum dado que, no geral, o plástico contrai mais rapidamente que outros materiais.[19]

Felizmente, este problema pode ser corrigido. O preenchimento destes polímeros com outros materiais, como fibra de vidro, grafite ou carbono, permite que o plástico contraia ao mesmo ritmo que outros materiais, em ambientes criogénicos. Materiais de preenchimento propostos por Hechtel [20] [21].

A condutividade térmica é a capacidade que determinados materiais têm de conduzir calor.

As **propriedades elétricas** descrevem o comportamento dos materiais quando lhes é aplicada uma corrente elétrica. Entre estas propriedades está a condutividade elétrica, que está relacionada com a capacidade de conduzir a corrente elétrica. No caso de um suporte para uma bobina supercondutora, é ideal que o material seja o mais eletricamente isolante possível. Ou seja, que possua grande resistividade elétrica.

As **propriedades químicas** são descritas quando o material entra em contacto com outros materiais ou com o ambiente. Estas apresentam a resistência à corrosão com ácidos ou outras soluções químicas. O alumínio por exemplo, em contacto com o meio ambiente, resiste bem à corrosão. Por outro lado, o ferro, nas mesmas condições, oxida, não resistindo à corrosão, pelo ar.

Neste capítulo, as propriedades mecânicas e térmicas irão ter um papel mais relevante, uma vez que a escolha do material depende, principalmente, da capacidade que este tem de suportar esforços mecânicos aplicados pela descida de temperatura e, posterior, normalização da mesma (temperatura ambiente) e da capacidade de não dilatarem nem contraírem demasiado, em função da temperatura atingida.

### 2.2.2 Celeron

Para uma escolha do material de substituição mais assertiva, é necessário compreender primeiro as propriedades mecânicas do material atualmente utilizado como suporte, assim como as propriedades mecânicas da fita supercondutora, apresentadas no próximo subcapítulo. Um dos materiais utilizados como suporte para bobinas supercondutoras é o Celeron, como apresenta a figura 2.12.



Figura 2.12: Suporte em Celeron atualmente utilizado

O laminado técnico denominado Celeron é um plástico industrial duro e denso fabricado sob processo de alta pressão e por aplicação de calor. O laminado é formado basicamente por camadas de tecido de algodão e aglutinado numa massa única com o uso de resina fenólica de elevadas características mecânicas. O Celeron é produzido sob a forma de chapas, bastões e tubos. Nas figuras 2.13 e 2.14 ilustram chapas em celeron e algumas peças moldadas neste material.

O Celeron classifica-se na Norma DIN (Deutsche Industrie Norm) pelo número 7735, e apresenta três qualidades principais:

- Celeron C.1001; (malha grossa)

- Celeron C.1002; (malha média)
- Celeron C.1003. (malha fina)



Figura 2.13: Peças moldadas em Celeron [22]

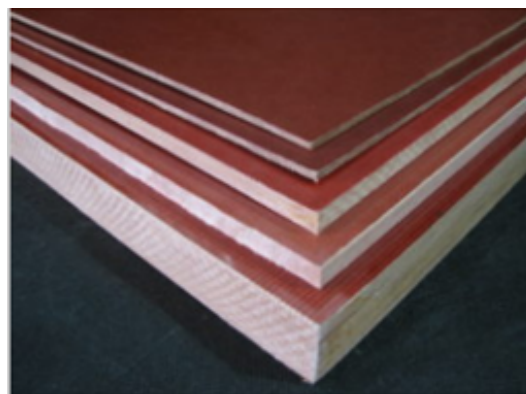


Figura 2.14: Chapas em celeron [22]

A principal característica que diferencia visualmente as diferentes malhas é a quantidade de fios por  $\text{cm}^2$ , sendo que a malha grossa possui 22 fios/ $\text{cm}^2$ , a malha média possui 34 fios/ $\text{cm}^2$  e a malha fina possui 45 fios/ $\text{cm}^2$ . Existe ainda um tipo de Celeron que possui 60 fios/ $\text{cm}^2$ , a malha extra-fina.

Este polímero possui um baixo coeficiente de condutividade e dilatação térmica, baixo fator de atrito, peso específico baixo e perfeita impermeabilidade. Tem também:

- Elevada resistência mecânica;
- Resistência à corrosão pela água do mar, ácidos e bases de baixa concentração;
- Elevada tolerância térmica até  $120^\circ\text{C}$ ;
- Indeformável e resistente a mudanças bruscas de temperatura;
- Não é inflamável;
- Fabrico ou obtenção de algum tipo de forma fácil e rápido;

Na tabela 2.2 estão presentes algumas caraterísticas do Celeron.

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas do Celeron

Celeron (0.5 a 2.5 mm de espessura)*	
Resistência à flexão	95 MPa
Resistência à tração	80 MPa
Resistência à compressão	185 MPa
Condutividade térmica	0.30 (W/m/K)
Coefficiente de expansão térmica	$1.8 \times 10^{-5}(\text{mm/mm}/^{\circ}\text{C})$

\*dimensões do material testado

Os dados acima foram retirados de catálogos de fabricantes da matéria-prima, representando resultados obtidos em experiências.

2.2.3 Fita SAT de 2ª geração

As fitas supercondutoras de alta temperatura 2G são filamentos estruturais formados por trechos de material supercondutor HTS e diferentes compostos. A estrutura macroscópica é um fio flexível que abaixo de uma temperatura crítica adquire as características elétricas de um supercondutor com várias gamas de largura, as fitas SAT 2G são fabricadas por um processo automatizado e contínuo, usando técnicas de deposição de finas camadas.

Na figura 2.15 são apresentadas todas as camadas constituintes da fita.

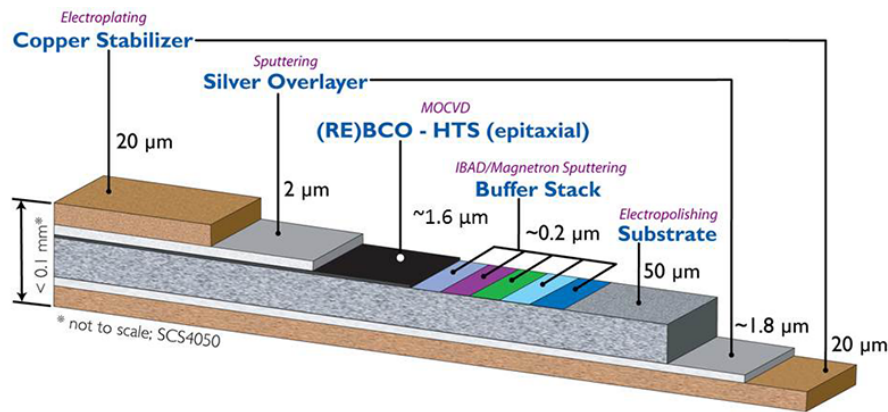


Figura 2.15: Adaptação da figurada composição da fita supercondutora 2G fabricada pela SuperPower [23]

Relativamente às propriedades físicas e mecânicas da fita YBCO, é apresentada a tabela 2.3.

Tabela 2.3: Propriedades físicas e mecânicas da fita YBCO.

Fita SAT 2G			
Largura	4±0.01 mm	6±0.01 mm	12±0.01 mm
Espessura	80 - 250 µm		
Tensão de tração crítica (77 K)	> 290 MPa		
Corrente crítica (I <sub>c</sub> ) mínima (77 K)	90 - 100 A	140 - 210 A	180 - 420 A
Coefficiente de expansão térmica	1.1 x10 <sup>-5</sup> (mm/mm/°C)		

Repare-se que, o coeficiente de expansão térmica da fita é de  $1.1 \times 10^{-5}$  mm/mm/°C, valor esse que se pretende igualar, aquando da escolha do material ideal. Uma vez que, para se acoplar dois materiais é necessário que estes se contraíam e se expandam de forma o mais idêntica possível.

## 2.2.4 Materiais de fácil acesso para impressão 3D

### 2.2.4.1 ABS – Acrilonitrila-butadieno-estireno

O *acrylonitrile-butadiene-styrene*, em inglês, ou ABS, é amplamente utilizado devido à sua relação custo/desempenho favorável. É um termoplástico comum usado para fabricar produtos moldados, leves e rígidos. O monómero acrilonitrila oferece boa resistência química, resistência ao envelhecimento, dureza, brilho e rigidez. O butadieno fornece ductilidade a baixas temperaturas e flexibilidade. O estireno fornece boa processabilidade, brilho e dureza. As suas propriedades podem ser ajustadas variando a proporção de unidades de cada monómero [24].

Os copolímeros *styrene-acrylonitrile* (SAN), em inglês, ou acrilonitrila-estireno, estão disponíveis desde a década de 1940 e, embora que possuisse maior resistência comparando com outros termoplásticos, tornando-o adequado para muitas aplicações, as suas limitações levaram à introdução de uma borracha, butadieno, como um terceiro monómero, produzindo a variedade de materiais popularmente referenciados como plásticos ABS. Estes tornaram-se disponíveis na década de 1950 e a disponibilidade desses plásticos e a facilidade de processamento levaram o ABS a tornar-se um dos polímeros de engenharia mais populares isto é, um dos polímeros que é transformado em peças utilizadas na produção de mercadorias. Produzido com as quantidades relativas apropriadas destes três monómeros, os fabricantes podem produzir ABS com as propriedades desejadas para aplicações típicas [25].

As estruturas químicas dos monómeros são mostradas na figura 2.16. As proporções dos monómeros variam tipicamente de 15 a 35 % de acrilonitrila, 5 a 30 % de butadieno e 40 a 60 % de estireno.

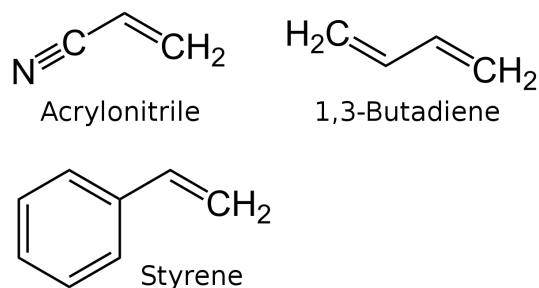


Figura 2.16: Estruturas químicas dos monómeros de ABS

As propriedades mecânicas do ABS são apresentadas na tabela 2.4.

Tabela 2.4: Propriedades mecânicas do ABS

ABS (4 mm de espessura)	
Resistência à flexão	70.5 MPa
Resistência à tração	39 MPa
Resistência à compressão	—
Coefficiente de expansão térmica	$9.5 \times 10^{-5}(\text{mm/mm}/^{\circ}\text{C})$

### 2.2.4.2 PLA - Ácido Polilático

O *Polylactic acid* (PLA), em português ácido polilático, é um termoplástico derivado de produtos naturais, como amido de milho ou cana-de-açúcar. Este polímero é considerado uma boa alternativa ao plástico à base de petróleo, pois possui várias propriedades desejáveis, como biodegradabilidade e biocompatibilidade. O PLA pode ser convertido em produtos plásticos por métodos de processamento como moldagem por injeção e extrusão e tem sido utilizado no campo biomédico para implantes prostéticos, cirurgias ósseas, entre outras aplicações [26].

O método de fabrico atual consiste na fermentação para produzir ácido láctico seguido de reações químicas, que usam altas temperaturas e solventes.

Um dos maiores desafios enfrentados pela indústria é melhorar a estabilidade térmica dos filamentos de PLA. Atualmente, estes são apenas estáveis até temperaturas de cerca de 60 ° C [27]. Além disso, os filamentos de PLA têm elevada rigidez, flexibilidade limitada, são quebradiços e, devido à baixa resistência à tração, são difíceis de processar em algumas máquinas de embalagem. No entanto, as películas de PLA têm excelentes qualidades de vedação quando é necessária uma vedação apertada de uma embalagem [28].

As propriedades mecânicas do PLA são apresentadas na tabela 2.5:

Tabela 2.5: Propriedades mecânicas do PLA

PLA (4 mm de espessura)	
Resistência à flexão	103 MPa
Resistência à tração	49.5 MPa
Resistência à compressão	—
Coefficiente de expansão térmica	$6.8 \times 10^{-5}(\text{mm/mm/}^{\circ}\text{C})$

### 2.2.4.3 PETG – Tereftalato de polietileno modificado com glicol

O *polyethylene terephthalate glycol-modified*, em inglês, ou o tereftalato de polietileno modificado com glicol, é um dos materiais de impressão 3D mais versáteis, robustos e fáceis de imprimir. Muitos proprietários de impressoras 3D e serviços de impressão 3D utilizam bastante este material nas suas peças impressas. O PETG é uma variante do PET, que por sua vez é dos plásticos mais utilizados do mundo: é um material transparente, com excelente resistência química e adequado a várias aplicações desde a fabricação de recipientes para alimentos e bebidas à fabricação de componentes eletrônicos [29].

O G no final significa modificado pelo glicol e refere-se a uma alteração na estrutura química do polímero que o torna mais transparente, menos frágil e mais fácil de processar do que o PET comum [30]. É importante realçar, que durante muito tempo, uma reciclagem de garrafa para garrafa de materiais de embalagem PET pós-consumo não foi possível devido à falta de conhecimento sobre a contaminação dos polímeros de embalagens durante o primeiro uso. Além disso, as eficiências de descontaminação dos processos de reciclagem eram, na maioria dos casos, desconhecidas. Nos últimos 20 anos, a coleta de PET e os processos de reciclagem fizeram um enorme progresso. Atualmente, estão disponíveis para o PET processos sofisticados de descontaminação, os chamados processos de reciclagem super limpos, capazes de descontaminar contaminantes pós-consumo para níveis de concentração de materiais PET virgens [31]. Em relação ao PETG, a reciclagem não é tão simples, mas, atualmente, já existem modos de reciclar o PETG, ajudando a preservar a natureza [32]. Por essas razões, tornou-se um dos copolímeros favoritos para a impressão 3D.

As propriedades mecânicas do PETG são apresentadas na seguinte tabela:

Tabela 2.6: Propriedades mecânicas do PETG

PETG (4 mm de espessura)	
Resistência à flexão	90 MPa
Resistência à tração	60 MPa
Resistência à compressão	—
Coeficiente de expansão térmica	$6.0 \times 10^{-5} (\text{mm/mm}/^{\circ}\text{C})$



## 2.2.5 Materiais de alto-desempenho

### 2.2.5.1 PEI – Polieterimida

O Polyetherimide, em inglês, ou Polieterimida, oferece um conjunto de atributos como elevada resistência ao calor, rigidez, resistência ao impacto, transparência, elevada resistência mecânica, boas propriedades elétricas, elevada resistência à chama, baixa geração de fumo e elevada resistência química, com a facilidade do processamento simples de fundição utilizado em resinas para moldagem por injeção, como policarbonato e ABS. Além da sua combinação exclusiva de propriedades que competem com as de plásticos especiais de elevado preço, a PEI exibe a processabilidade dos termoplásticos de engenharia tradicionais, embora sejam necessárias temperaturas de fusão mais altas. A excelente estabilidade térmica é demonstrada pela manutenção da viscosidade estável do fundido após várias retificadoras e remoldagens. O PEI pode ser processado na maioria dos equipamentos existentes [28].

Este polímero amorfo com o nome comercial Ultem resultou do trabalho de pesquisa de uma equipa liderada por J.G. Wirth no início dos anos 70. O processo laboratorial inicial envolveu uma síntese dispendiosa e difícil. O desenvolvimento posterior resultou em várias descobertas que levaram a um processo de produção simplificado e económico [33].

Para além disso, esta excelente resina de fluxo pode ser usada para moldagem de peças complicadas e estruturas finas (tão finas quanto 0,01 centímetros). O PEI é adequado para o uso em componentes internos de produtos elétricos e eletrónicos, de eletrodomésticos, de aplicações automóvel e até mesmo em aplicações aeroespaciais e de transporte [34]. As figuras 2.17 e 2.18 apresentam peças e chapas produzidas em PEI.

A tabela 2.7 apresenta as propriedades mecânicas do PEI.

Tabela 2.7: Propriedades mecânicas do PEI

PEI (2.5 mm de espessura)	
Resistência à flexão	112 MPa
Resistência à tração	69 MPa
Resistência à compressão	181 MPa
Coefficiente de expansão térmica	$5.58 \times 10^{-5}(\text{mm/mm}/^{\circ}\text{C})$



Figura 2.17: Chapas e barras em PEI  
[35]



Figura 2.18: Bocais tabágicos em PEI  
[36]

### 2.2.5.2 PEEK - Éter de Poliéter de Cetona

O Polyether ether ketone (PEEK), em português éter de poliéter de cetona, é um polímero termoplástico orgânico incolor da família de Polyaryletherketone (PAEK), poliarletercetona, usado em aplicações de engenharia [37].

O PEEK é um termoplástico semicristalino com excelentes propriedades de resistência mecânica e química que são mantidas a altas temperaturas. As condições de processamento usadas para moldar PEEK podem influenciar a cristalinidade e, portanto, as propriedades mecânicas. O PEEK tem uma temperatura de transição vítrea por volta dos 143 ° C e funde-se em torno dos 343 ° C. É altamente resistente à degradação térmica, bem como ao ataque por ambientes orgânicos e aquosos. É atacado por halogénios e ácidos fortes, além de alguns compostos halogenados e hidrocarbonetos alifáticos em altas temperaturas. Dissolve-se completamente em ácido sulfúrico concentrado à temperatura ambiente. Devido à sua robustez, o PEEK é usado para fabricar itens usados em aplicações exigentes, incluindo rolamentos, peças de pistão, bombas, válvulas de placas de compressor e isolamento de cabos. É um dos poucos plásticos compatíveis com aplicações de ultra-alto vácuo. É amplamente utilizado nas indústrias aeroespaciais, automóvel e de processos químicos [38][39].

Algumas das propriedades mecânicas do PEEK são expostas na tabela 2.8.

Tabela 2.8: Propriedades mecânicas do PEEK

PEEK (2.5 mm de espessura)	
Resistência à flexão	170 MPa
Resistência à tração	95 MPa
Resistência à compressão	118 MPa
Coefficiente de expansão térmica	$4.68 \times 10^{-5}(\text{mm/mm/}^{\circ}\text{C})$

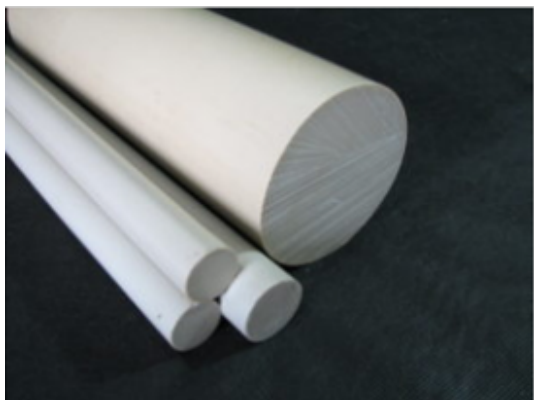


Figura 2.19: Barras em PEEK [40]



Figura 2.20: Válvulas em PEEK natural [40]

## 2.3 Reflexão da revisão literária

Atendendo às necessidades do problema em questão, é necessário referir que será dada uma maior importância ao custo e à facilidade de impressão do molde, pelo que os materiais com maior relevância para esta dissertação serão os materiais de fácil acesso e uso comum, presentes na secção 2.2.4, uma vez que são menos dispendiosos e mais fáceis de obter. Os materiais de alta-performance têm um custo mais elevado e são apenas passíveis de serem impressos em máquinas com características especiais e difíceis de adquirir a nível global, nos dias de hoje. Portanto, para esta dissertação é proposta uma investigação do comportamento dos respetivos materiais: ABS, PLA e PETG, na presença de azoto líquido, para servir de suporte para bobinas supercondutoras.



## PRÉ-ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

*Neste capítulo descreve-se o protocolo utilizado para a escolha do material a utilizar no protótipo final. Posteriormente, será exposto o procedimento experimental implementado para obter o coeficiente de expansão térmica dos respetivos materiais em estudo. De seguida foram apresentados e discutidos os resultados obtidos durante os ensaios laboratoriais. Contendo ainda uma secção referente a considerações finais a ter, relativamente à configuração da impressão do protótipo final.*

### 3.1 Protocolo implementado

São vários os softwares CAD, que permitem realizar desenho assistido por computador. O ANSYS 2020 R2 (Student) funciona, não só como um software CAD, mas também como um software CAE (computer aided engineering). Isto é, engenharia assistida por computador, permitindo criar uma simulação que testa a durabilidade de um produto, a distribuição de temperatura, o movimento de fluídos e propriedades eletromagnéticas. Esta foi uma das principais razões para a escolha deste software, no qual foram realizadas a construção de moldes com geometrias primitivas para uns primeiros ensaios, a construção do protótipo final e uma posterior simulação, para otimizar o molde selecionado.

As geometrias primeiramente ensaiadas, foram prototipadas com uma geometria retangular e uma geometria cilíndrica. As barras retangulares foram impressas para determinar o material que se comportava melhor, quando se pretende imprimir algo mais aproximado com um paralelepípedo. Como é uma geometria mais simples, serviu como molde de teste dos materiais numa fase embrionária deste estudo. Estas barras contém as seguintes dimensões: 50 mm (eixo do x) x 20 mm (eixo do y) x 5 mm (eixo do z), apresentadas no anexo A.

Relativamente às peças cilíndricas, estes foram desenhados e ensaiados, pois exibem

uma forma aproximada ao molde final, apresentando dimensões de 50 mm de diâmetro e 5 mm de altura.

As figuras 3.1 e 3.2 representam os dois moldes construídos.

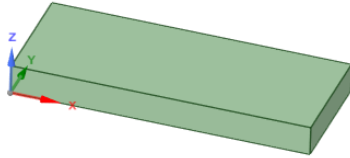


Figura 3.1: Barra desenhada no ANSYS

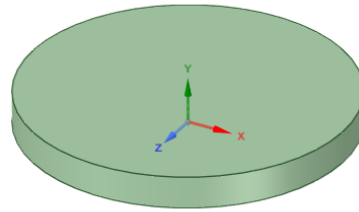


Figura 3.2: Cilindro desenhado no ANSYS

Para além destas duas peças apresentadas, foram propostos dois padrões para cada molde: o padrão gyroid e o grid. Dentro de cada padrão e geometria, foram ainda acrescentadas três vertentes de preenchimento: 10%, 50% e 80%. Isto para se contornar limitações e oferecer uma maior sustentação mecânica, verificando, se com maior ou menor preenchimento, a peça contrairia mais ou menos, assim como no caso do padrão gyroid ou grid se observa qual o que apresenta melhores resultados. Nas figuras 3.7 e 3.8 ilustram-se os vários preenchimentos e padrões nas peças.

Nas figuras 3.3 e 3.4 observam-se os dois padrões utilizados.

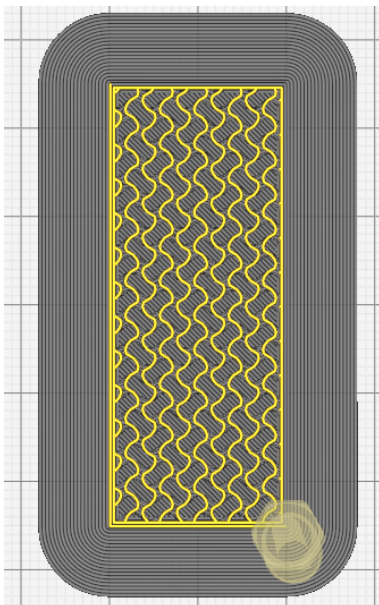


Figura 3.3: Padrão gyroid

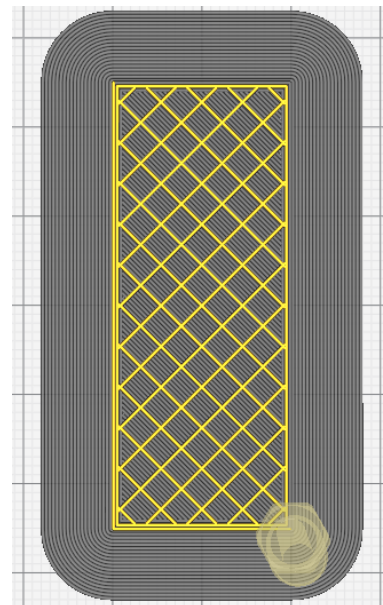


Figura 3.4: Padrão grid

Foram ainda propostos dois métodos de impressão: o vertical e o horizontal, tentando também minimizar a contração imposta pela descida de temperatura. Destaca-se o facto de que se a peça tiver um maior ou um menor factor de preenchimento, a resistência mecânica da peça é influenciada, pelo que existiu necessidade de explorar essa característica. Da figura 3.5 até à 3.8 mostra-se a mesa de impressão utilizada e realçam-se os diferentes padrões e preenchimentos.

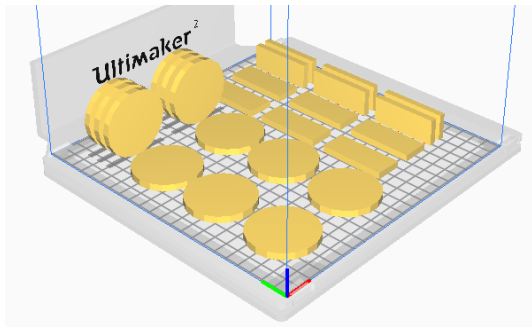


Figura 3.5: Mesa de impressão

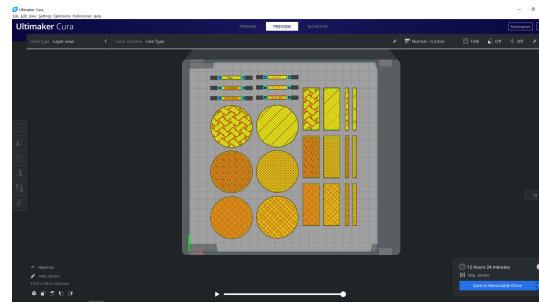


Figura 3.6: Mesa de impressão vista de cima

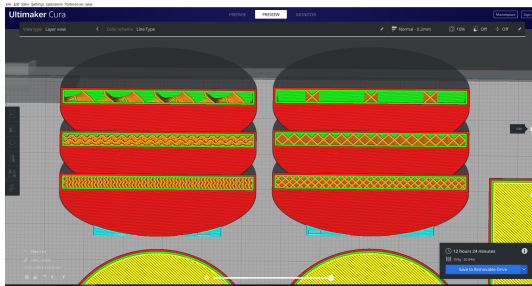


Figura 3.7: Os 3 preenchimentos em cilindros verticais com padrão gyroid e grid

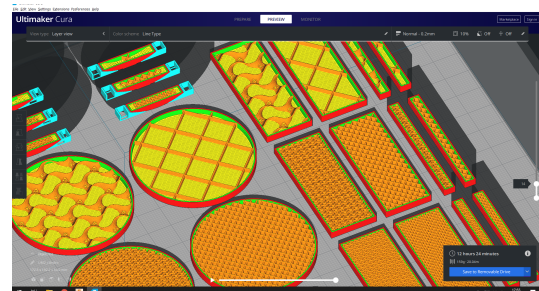


Figura 3.8: Várias geometrias, padrões e preenchimentos

Nas medições do coeficiente de contração térmica, usando micrómetros, pretendeu-se que as peças fossem medidas a uma temperatura criogénica constante. Ou seja, houve a necessidade de manter a temperatura mínima que as peças atingiam, quando submersas em azoto líquido. As peças foram mergulhadas durante 10 a 15 minutos e quando se retiravam do azoto, para efetuar as medições, ficavam apenas cerca de 90 segundos expostos à temperatura ambiente, havendo apenas tempo para realizar 3 medições. Uma vez que eram necessárias mais que 3 medições por peça, estas eram mergulhadas novamente por mais 2 minutos, de modo a manter a temperatura mínima. Este processo de medição irá ser abordado mais pormenorizadamente na secção 3.4.

A partir do gráfico, presente na figura (3.9), observa-se que passados dez minutos submersos, foram atingidos  $-173,69\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se o molde permanecer por mais cinco minutos no azoto líquido, medem-se  $-176,53\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Quis-se entender melhor o comportamento do material, pelo que se mergulhou o molde por uma hora, em que se obteve  $-186,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Realizado um novo ensaio com o molde submerso duas horas, mediu-se a uma temperatura de  $-187,69\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e ainda, outro com três horas e trinta minutos de duração, com um mínimo de temperatura atingida de  $-196,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

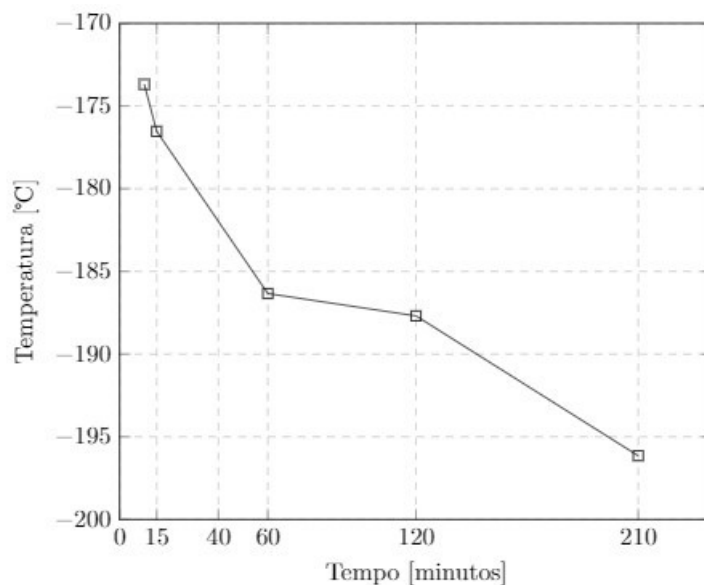


Figura 3.9: Variação da Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] em função do Tempo [minutos] do material selecionado

Foram realizados vários testes para se perceber a temperatura que o molde atingia, após passar determinado tempo mergulhado em azoto líquido. Apesar de o ambiente ser criogénico, 10 segundos depois de ser retirado do azoto, o molde exibe temperaturas bastante superiores ( $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), pelo que houve necessidade de se inserir um deslocamento para compensar a temperatura apresentada (offset para os  $-196,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). As temperaturas foram medidas com o auxílio de um termómetro Fluke 287, presente na figura 3.10 e os 10 segundos referidos correspondem ao tempo necessário para a medição da temperatura estabilizar e se obter um resultado o mais fiável possível.

Importa realçar que, existem incertezas na medição das temperaturas. Essas incertezas advieram de alguns fatores como o facto de a ponta do termopar, do termómetro, ser cilíndrica. Pelo que, apenas uma parte da ponta está em contacto com a superfície do molde, a outra face fica exposta à temperatura ambiente, chegando assim a um equilíbrio térmico entre a temperatura externa e a temperatura, efetiva, do molde.

Outro dos fatores é a inércia térmica dos moldes, que traduz a capacidade de contrariar as variações de temperatura. Poder-se-ia pensar que a inércia térmica dos termoplásticos utilizados é tão reduzida que seria possível subir dos  $-196,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  até aos  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mas nunca



num intervalo de 10 segundos. Basta pensar na hipótese de se colocar um cubo de gelo em contacto com um meio de elevada temperatura e verificar que este não se transforma instantaneamente em água ou vapor de água.

Matematicamente, a inércia térmica ( $I$ ) é a raiz quadrada do produto da condutividade térmica ( $\lambda$ ) pela capacidade térmica volumétrica ( $cp$ ), como demonstra a Equação 3.1. A sua unidade do SI é o  $\left[ J \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1} \cdot s^{-\frac{1}{2}} \right]$  [41].

$$I = \lambda \times cp \quad (3.1)$$

Quanto mais baixa a inércia térmica, mais baixa é a condutividade térmica. A condutividade térmica dos polímeros é bastante mais baixa, quando comparada com a condutividade dos materiais metálicos, e de alguns materiais cerâmicos. Pelo que os termoplásticos não oferecem grande resistência às variações de temperatura. No arrefecimento, baixa condutividade pode provocar não uniformidade de temperatura e contração. Isto pode resultar em deformação do material, delaminação ou espaços vazios no molde [42].

Por ser uma variação de temperatura muito rápida, as medições da temperatura carecem de ser confirmadas com outro instrumento de medida ou outro método mais fiável. Uma das sugestões para ultrapassar este tema, seria colocar um furo nas peças e moldes, de modo a que fosse possível acoplar temporariamente a ponta de prova do termopar com o material. Desta forma, o termopar estaria na sua maioridade em contacto com o material e não com o meio ambiente, e mediria com mais fiabilidade a temperatura da peça.

Em termos relativos, a escolha do material, molde e configuração não é afetada por este deslocamento (offset) de temperatura, uma vez que seja qual for a diferença de temperatura  $[\Delta T]$ , a escolha do material será sempre a mesma. Isto porque o valor de  $\Delta T$  será transversal a todos os moldes.



Figura 3.10: Termómetro Fluke 287 [43]

No gráfico da figura 3.11, apresentam-se as temperaturas atingidas nos ensaios, para se efetuar as medições das barras e cilindros. Observa-se uma linha vermelha, que representa a temperatura a ser mantida constante no molde. Daí nasce a necessidade de se fazer várias pausas entre as medições e submergir novamente a peça, sem estar muito tempo à temperatura ambiente, e desta forma, não precisar de permanecer mais de dois minutos no azoto, para voltar a atingir a temperatura mínima atingida anteriormente. Assim sendo, todas as medições são realizadas em condições muito próximas.

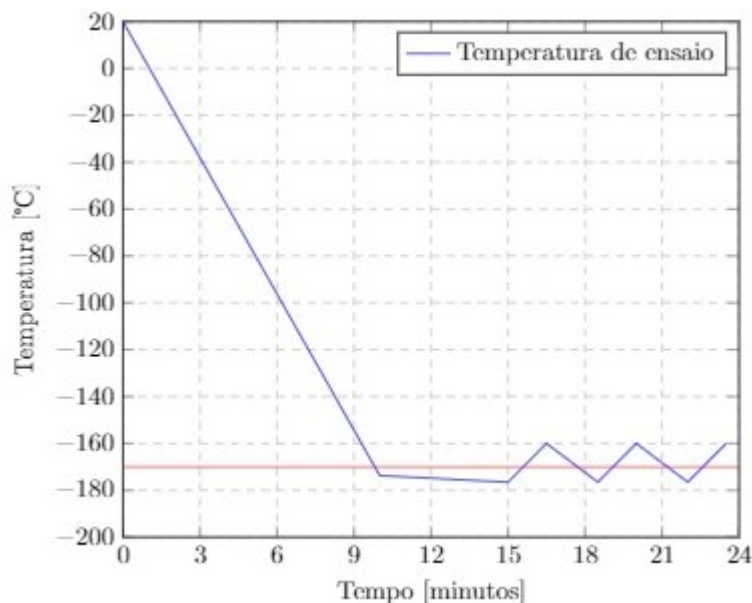


Figura 3.11: Variação da Temperatura [°C] em função do Tempo [minutos], protocolo aplicado nos ensaios laboratoriais

## 3.2 Procedimento experimental

De modo a se observar o comportamento mecânico dos moldes de teste, estes foram submersos em azoto líquido durante 10 a 15 minutos. A figura 3.12 representa a bancada de ensaio utilizada, assim como os vários instrumentos utilizados.

O material utilizado e representado na figura 3.12 foi o seguinte:

- Pinças - utilizadas para segurar as peças, de modo a obter uma medição rápida e com a menor transferência de calor possível;
- Moldes - impressos em vários materiais, preenchimentos e padrões. Nesta figura, os moldes encontram-se mergulhados em azoto líquido.
- Recipiente de esferovite - utilizado para colocar as peças de ensaio submersas em azoto líquido. Uma vez que, o esferovite minimiza qualquer transferência de calor, por condução, efetuada entre o que se encontra no recipiente e o meio exterior.

### 3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

- Termómetro Fluke 287 - utilizado para medir a temperatura atingida por um certo material, logo após a submersão em azoto líquido.
- Paquímetro - instrumento de medição de dimensões com uma precisão de 0,01 mm, utilizado para a medição do molde final, pois este ultrapassa os 5 cm de diâmetro.
- Micrómetros - instrumentos de medição de dimensões com uma precisão de 0,001 mm, utilizados para obter uma medição mais precisa da contração do material. Devido às dimensões das peças, houve necessidade de utilizar dois micrómetros diferentes, pois as gamas disponíveis são de (0 mm -25mm) e de (25 mm -50 mm).



Figura 3.12: Bancada de ensaio

Uma vez que, após a impressão dos moldes primitivos torna-se difícil perceber qual o preenchimento (10 %, 50 % ou 80 %) e padrão (gyroid ou grid) de cada peça, foi-lhes atribuída uma numeração logo após a impressão, como mostra a tabela 3.1, de modo a serem facilmente identificados no decorrer dos ensaios.

Antes de mergulhar as peças, as dimensões das mesmas foram previamente medidas a uma temperatura ambiente. Primeiramente e relativamente aos cilindros realizou-se uma medição da espessura e do diâmetro dos mesmos. A espessura foi medida em 5 pontos e os diâmetros perpendiculares entre si medidos em X e em Y, como mostra a figura 3.13. De modo a obter uma medição mais precisa, foram realizadas 3 medições e, posteriormente, calculada a média, para cada diâmetro (X e Y).

Tabela 3.1: Enumeração dos moldes primitivos

Cilindros	Nº	Impressão Vertical		Nº	Impressão Horizontal	
	#1	Gyroid	10%	#7	Gyroid	10%
	#2		50%	#8		50%
	#3		80%	#9		80%
	#4	Grid	10%	#10	Grid	10%
	#5		50%	#11		50%
	#6		80%	#12		80%
Barras	Nº	Impressão Horizontal		Nº	Impressão Vertical	
	#13	Gyroid	10%	#19	Gyroid	10%
	#14		50%	#20		50%
	#15		80%	#21		80%
	#16	Grid	10%	#22	Grid	10%
	#17		50%	#23		50%
	#18		80%	#24		80%

As figuras 3.14 e 3.13 exibem os pontos que se utilizaram para medir as dimensões entre os pontos, nas duas geometrias.

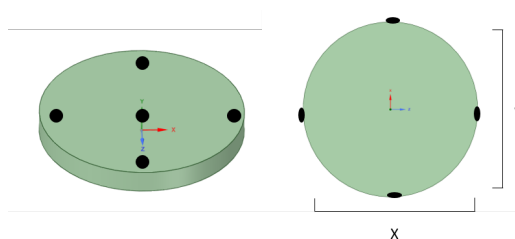


Figura 3.13: Pontos de medição em cilindros

Após a submersão, as dimensões das peças foram novamente e igualmente mensuradas, mas num curto intervalo de tempo, para que as peças mantivessem uma temperatura constante.

Em relação às barras, a espessura e a largura, das mesmas, foram medidas em 3 pontos. O comprimento apenas num ponto, mas com 3 medições, e posterior média.

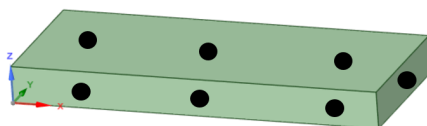


Figura 3.14: Pontos de medição em barras

O modo que se utilizou para se diferenciar um bom e um mau material para criogenia, foi tentar perceber qual o material que trabalharia menos ou mais quando sujeito a

grandes diferenças de temperatura. Isto é, quanto menos o material submerso em azoto líquido, se contrair, melhor. Isso significa que tem uma maior resistência térmica, não sofrendo grandes alterações quando colocado ambientes criogénicos. Esta contração do material pode ser medida e quantificada pelo Coeficiente de Expansão/ Contração Térmica (CET).

Para se obter o coeficiente de expansão/contração térmica, recorreu-se à expressão:

$$\Delta l = l_0 \times \alpha \times \Delta T \quad (3.2)$$

Em que,

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \times \Delta T} \text{ (mm/mm/}^\circ\text{C)}$$

O  $\alpha$  corresponde ao coeficiente de expansão/contração térmica dos diversos moldes e é calculado através da diferença entre o comprimento inicial e final e a diferença entre a temperatura inicial e final.

### 3.3 Impressoras utilizadas e processo de impressão

Nos dias de hoje, a impressão 3D é uma mais valia para muitos sectores da nossa sociedade.

No âmbito desta dissertação, as peças de ensaio foram produzidas, inicialmente, em parceria com o FABLAB da Universidade Nova de Lisboa, pela Ultimaker 2+ (na figura 3.15) e, posteriormente, por uma impressora adquirida pelo departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, a Ender 3 (na figura 3.16). Esta nova aquisição permitiu imprimir, testar, reimprimir, inovar, o que facilitou bastante o processo de impressão, sem necessitar de recorrer a outra entidade.



Figura 3.15: Impressora Ultimaker 2+ [11]



Figura 3.16: Impressora Ender 3 [44]

Apesar de todas estas vantagens, apareceram outros temas e complicações que foram necessários contornar, para se obter uma impressão desejada. No caso da impressão das peças de PETG e PLA, as adversidades foram mínimas. As 24 peças de cada material foram impressas de uma só vez, preenchendo a mesa de impressão, houve uma boa adesão do material à placa e as peças foram produzidas com sucesso. Relativamente ao ABS e apesar de se configurar as temperaturas e outras definições adequadas a este material, existiram alguns obstáculos. Nomeadamente, quando se tentou imprimir as respetivas 24 peças, o material não aderiu e as peças não eram concluídas. Em alternativa, e de modo a obter uma melhor adesão à mesa de impressão, reduziu-se o número de peças a serem impressas de uma só vez e colocou-se um género de uma camada à volta das primeiras camadas da peça, funcionando como um suporte. Esta funcionalidade denomina-se de BRIM, na secção dos suportes e adesão à placa.

Uns dos pontos de decisão na escolha da melhor configuração para imprimir o molde final, foi a quantidade de material utilizado e o tempo que se demora para produzir o molde. Deste modo, tem de se considerar qual direção de impressão mais adequada, vertical ou horizontal. As figuras 3.17 e 3.18 exibem as duas formas de impressão:

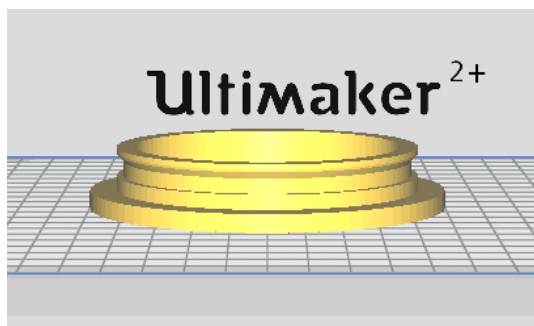


Figura 3.17: Impressão na horizontal



Figura 3.18: Impressão na vertical

Relativamente a estas configurações, foram analisadas a quantidade de material necessária e o tempo de produção. Tendo cada molde 50% de preenchimento e um padrão gyroid, a configuração de uma impressão na vertical necessita de 45 gramas e 5 horas e 27 minutos. Enquanto que, optando por uma impressão na horizontal são apenas necessárias 27 gramas de material e 2 horas e 45 minutos. Isto justifica-se com o facto de que no caso da figura 3.18, há uma necessidade de suportar o molde à medida que é produzido, o que leva a um maior gasto de tempo e material. Portanto, mesmo que a configuração vertical apresente melhores CET's, esta vai ser rejeitada, uma vez que em termos práticos mostra-se inadequada.

As impressoras low-cost, presentes nas figuras 3.15 e 3.16, mostraram uma boa performance, assim como os filamentos de material utilizados. Houve alguns cuidados, tanto na



calibração da placa de adesão como nas temperaturas de extrusão dos materiais, de modo a obter um resultado desejado. É de se notar que, o facto de se possuir uma impressora no laboratório, trouxe muitas vantagens e torna-se uma mais valia, no caso de impressão de moldes para outros âmbitos ou dissertações.

#### 3.4 Resultados obtidos e discussão dos resultados

Como descrito na secção 3.2, foram realizados ensaios em azoto líquido dos moldes com geometrias primitivas, de modo a medir o coeficiente de contração térmica dos mesmos, tendo como finalidade chegar a um material, padrão, preenchimento e método de impressão ideal para construir um suporte de bobinas supercondutoras.

As tabelas seguintes apresentam uma comparação de padrões e preenchimentos em cada material individualmente, geometria e posição de impressão. Os resultados são obtidos através da expressão 3.2 (CET) e após a submersão das peças em azoto líquido.

Na figura 3.19 são apresentadas algumas das amostras produzidas em PETG e que foram testadas.

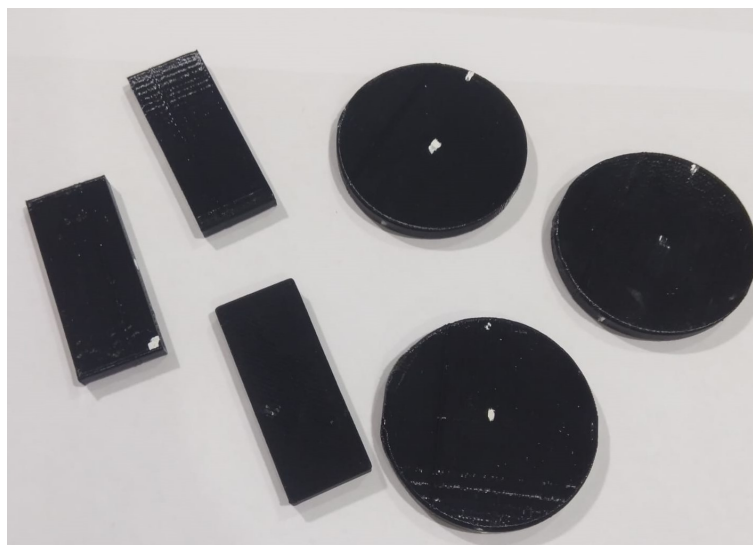


Figura 3.19: Algumas das amostras impressas em PETG

A tabela 3.2 apresenta os CET's das barras impressas em PETG. As amostras que se destacaram pela positiva foram marcadas a verde, e as que apresentaram uma pior performance foram assinaladas a vermelho. O mesmo código de cores se aplica a todas as outras tabelas.

Avaliando o material numa fase inicial, isto é, sem geometrias muito complexas, observam-se os coeficientes de expansão/contração térmica das barras e recolhem-se algumas conclusões, apesar de não refletirem o resultado final, por serem na verdade ensaios de teste iniciais. O X e o Y servem como dimensões de medição (entre pontos). Nas barras, é o correspondente ao comprimento e à largura e, relativamente aos cilindros, o X e o Y representam dois diâmetros perpendiculares entre si.

Tabela 3.2: Comparação de padrões e preenchimentos entre barras de PETG

Barras							
Impressão Horizontal							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#13	4,58	4,24	10%	#16	4,26	2,88
50%	#14	5,35	4,16	50%	#17	5,32	4,33
80%	#15	5,35	3,88	80%	#18	5,42	5,04
Impressão Vertical							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#19	5,79	5,14	10%	#22	5,29	2,67
50%	#20	4,46	3,9	50%	#23	4,47	4,72
80%	#21	6,13	5,71	80%	#24	5,69	4,76

No caso de se escolher uma impressão vertical, o melhor preenchimento será o das amostras #20 e #23. Numa hipótese de se imprimir horizontalmente, as escolhas acertadas seriam uma configuração igual às amostras #13 e #16. Reparou-se também que escolhendo um preenchimento de 80%, num molde retilíneo ou algo aproximado a uma barra, esse vai ser o pior dos cenários, como ilustram as amostras #15, #18, #21 e #24. Uma vez que, apresentaram uma maior deformação, neste caso contração, e obtiveram os maiores valores de CET's.

Convertendo os CET's, dos melhores casos, em percentagem de contração, obteve-se 0,92% para a amostra #16; e uma contração de, 0,964% para a peça #20.

A tabela 3.3 mostra os CET's dos cilindros produzidos em PETG.

Tabela 3.3: Comparação de padrões e preenchimentos entre cilindros de PETG

Cilindros							
Impressão Vertical							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#1	4,97	5,75	10%	#4	5,38	3,54
50%	#2	5,6	4,2	50%	#5	5,25	4,61
80%	#3	5,26	4,49	80%	#6	6,32	6,45
Impressão Horizontal							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#7	6,08	6,57	10%	#10	5,49	6,85
50%	#8	5,38	5,93	50%	#11	5,53	6,31
80%	#9	7,33	6,06	80%	#12	5,91	5,3

Um dos focos na escolha do melhor padrão e da melhor forma de impressão é a uniformidade, principalmente nos cilindros, em que os diâmetros X e Y devem contrair



de igual forma.

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que, no caso de se optar por uma impressão na vertical existem duas opções viáveis: as amostras #3 ou #5. No caso de, se escolher uma impressão na horizontal, o melhor dos preenchimentos é 50%, tanto num padrão gyroid como num padrão grid, correspondente às amostras #8 e #11.

O pior dos casos é uma impressão horizontal com um padrão gyroid e um preenchimento de 80% - amostra #9.

Calculando percentagem de contração, obtém-se 1,137% para a amostra #3 e 1,281% de contração na amostra #8.

Para um molde cilíndrico em PETG, a amostra #3, é a opção ideal. Se se quer encontrar uma opção mais prática e se se considerarem algumas condições de engenharia, como uma maior facilidade de impressão e menos gasto de material, a escolha otimizada seria a amostra #8. Uma vez que, o protótipo final contém uma abertura central, uma impressão na vertical, implicaria recorrer a suportes de impressão e, consequentemente, mais desperdício de material e de tempo.

Na figura 3.20 são apresentadas algumas das amostras de PLA utilizadas em ensaios de teste iniciais.

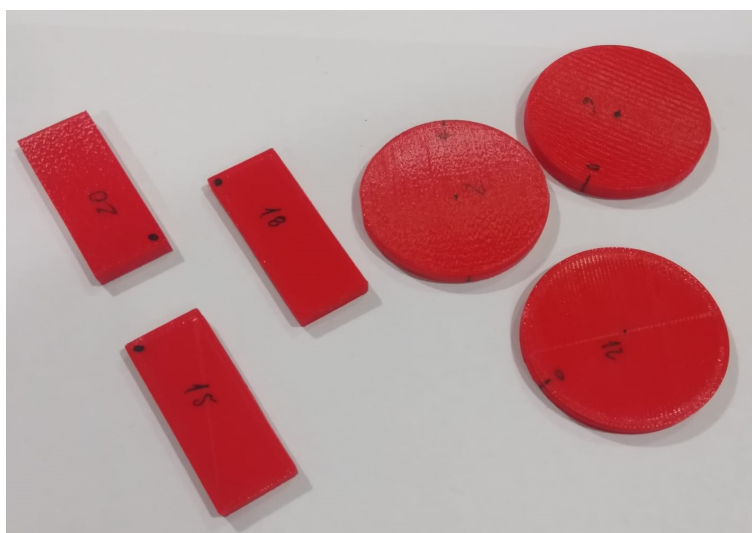


Figura 3.20: Algumas das amostras impressas em PLA

A tabela 3.4 exhibe os CET's das barras de PLA.

Tabela 3.4: Comparação de padrões e preenchimentos entre barras de PLA

Barras							
Impressão Horizontal							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#13	6,71	5,07	10%	#16	5,87	5,11
50%	#14	6,36	5,78	50%	#17	4,28	5,61
80%	#15	6,67	5,47	80%	#18	6,27	5,78
Impressão Vertical							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#19	5,37	4,78	10%	#22	6,02	5,12
50%	#20	6,27	5,29	50%	#23	6,41	5,66
80%	#21	6,85	5,2	80%	#24	6,32	6,12

Analisando a tabela 3.4, pode-se dizer que numa configuração onde se imprime verticalmente, o preenchimento ideal a utilizar é o de 10%. Se por outro lado, se opta por uma impressão horizontal, o melhor preenchimento a usar é o de 50%, tanto em gyroid como em grid. Observando os piores casos, em que a contração é superior, constata-se que esses casos contêm um preenchimento de 80%.

Se se analisar os CET's dos melhores cenários, com uma abordagem percentual, repara-se que para a amostra #17 obteve-se 1,21% de contração; e, no caso de uma impressão vertical, uma percentagem de contração de 1,16% para a amostra #19.

A tabela 3.5 apresenta os CET's dos cilindros produzidos em PLA.

Tabela 3.5: Comparação de padrões e preenchimentos entre cilindros de PLA

Cilindros							
Impressão Vertical							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#1	6,93	5,4	10%	#4	5,58	6,12
50%	#2	6,38	6,38	50%	#5	6,31	5,56
80%	#3	6,16	5,35	80%	#6	5,56	6,2
Impressão Horizontal							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#7	5,6	6,23	10%	#10	6,35	3,9
50%	#8	5,45	6,01	50%	#11	6,36	6,32
80%	#9	7,05	3,7	80%	#12	6,41	6,2

Analisando os resultados obtidos, depreende-se que, no caso de, se utilizar uma impressão na vertical, o preenchimento escolhido seria o de 80%. Se a preferência for uma impressão na horizontal, o melhor preenchimento é o de 50%, tanto em padrão gyroid

### 3.4. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

como em grid. Captando os piores casos, percebe-se que com uma configuração como a das amostras #1, #9 e #12, obtém-se uns CET's mais elevados e desuniformes.

Convertendo os CET's para uma pontuação percentual, os melhores casos apresentam: 1,301% para a amostra #6 e 1,3% para um molde com a configuração da amostra #8.

Para uma impressão em PLA, e tendo em conta que a geometria do molde final se assemelha muito à de um cilindro, a escolha ideal seria uma impressão na horizontal, em gyroid com 50 % (#8). Visto que, a escolha ideal é a que apresenta mais facilidade de impressão e menos desperdícios de tempo e material, não foi necessária uma otimização.

Na figura 3.21 são apresentadas algumas das amostras impressas em ABS e que foram utilizadas em ensaios iniciais.

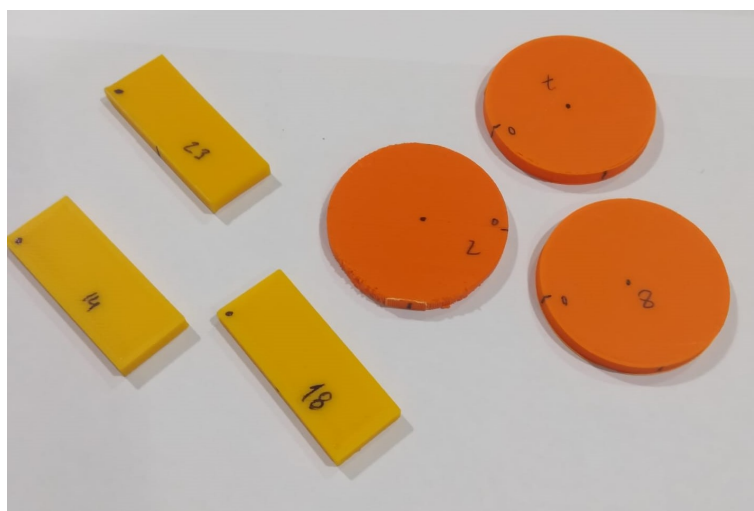


Figura 3.21: Algumas das amostras impressas em ABS

A tabela 3.6 evidencia os CET's das barras produzidas em ABS.

Tabela 3.6: Comparação de padrões e preenchimentos entre barras de ABS

Barras							
Impressão Horizontal							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#13	5,82	6,91	10%	#16	5,56	6,45
50%	#14	5,68	5,64	50%	#17	5,99	6,36
80%	#15	6,24	6,09	80%	#18	5,8	7,09
Impressão Vertical							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#19	2,93	6,01	10%	#22	4,79	5,81
50%	#20	4,51	5,74	50%	#23	5,78	5,63
80%	#21	4,31	5,82	80%	#24	5,63	6,02

Através destes resultados, deduziu-se que um preenchimento de 50% é o melhor dos casos, seja numa impressão horizontal ou vertical, ou num padrão grid ou gyroid, uma vez que apresenta uniformidade na contração. Considerando os piores casos, infere-se que produzir um molde com a configuração das amostras #15 ou #18, não é a melhor abordagem.

Percentualmente, os melhores casos apresentam CET's com valores de 1,227% para a amostra #14 e 1,25% para a amostra #23.

A tabela 3.7 revela os CET's dos cilindros impressos em ABS.

Tabela 3.7: Comparação de padrões e preenchimentos entre cilindros de ABS

Cilindros							
Impressão Vertical							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#1	5,68	4,15	10%	#4	5,45	5,33
50%	#2	5,63	4,82	50%	#5	5,44	5,05
80%	#3	5,19	5,33	80%	#6	5,81	5,24
Impressão Horizontal							
Gyroid				Grid			
Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	Fill	Nº	$X \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$	$Y \times 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
10%	#7	5,43	6,31	10%	#10	8,36	5,4
50%	#8	4,78	5,43	50%	#11	5,41	4,97
80%	#9	5,69	5,23	80%	#12	5,46	4,77

Para um molde cilíndrico em ABS, constata-se que um preenchimento de 50% é o melhor numa impressão horizontal e que, no caso de, uma impressão vertical, a amostra que se destaca pela positiva é a #3. Verificando os piores casos, o pior preenchimento é o de 10%, tanto num molde impresso verticalmente como horizontalmente, uma vez que apresenta os CET's mais elevados e uma maior discrepância entre os diâmetros X e Y.

Transformando estes resultados em percentagem de contração, obteve-se 1,152% para a amostra #3 e 1,17% para um molde como a amostra #8.

No caso de se imprimir cilíndricamente, a escolha ideal, e também otimizada, é uma impressão na horizontal, com 50% de preenchimento e em gyroid (#8).

### 3.5 Considerações finais

Refletindo todos estes resultados, é possível chegar a um veredicto, no que toca ao material, preenchimento e padrão a ser utilizado na impressão do molde final.

A tabela 3.8 apresenta o resumo das melhores percentagens de contração de cada material.

Tabela 3.8: Percentagens de contração de cada material

PETG		PLA		ABS	
Nº da peça	Percentagem de contração (%)	Nº da peça	Percentagem de contração (%)	Nº da peça	Percentagem de contração (%)
#3	1,137	#6	1,301	#3	1,152
#8	1,281	#8	1,300	#11	1,170
#16	0,920	#17	1,210	#14	1,227
#20	0,964	#19	1,160	#23	1,250

Adianta-se desde já que, o ABS foi o que apresentou a pior performance. Uma vez que, assim que se mergulharam as peças de ABS no azoto líquido, ouviu-se um som que se compara ao de um plástico a rachar/partir e, efetivamente, após a remoção das peças do azoto líquido foi possível verificar presença de algumas fissuras, como mostra a figura 3.22.

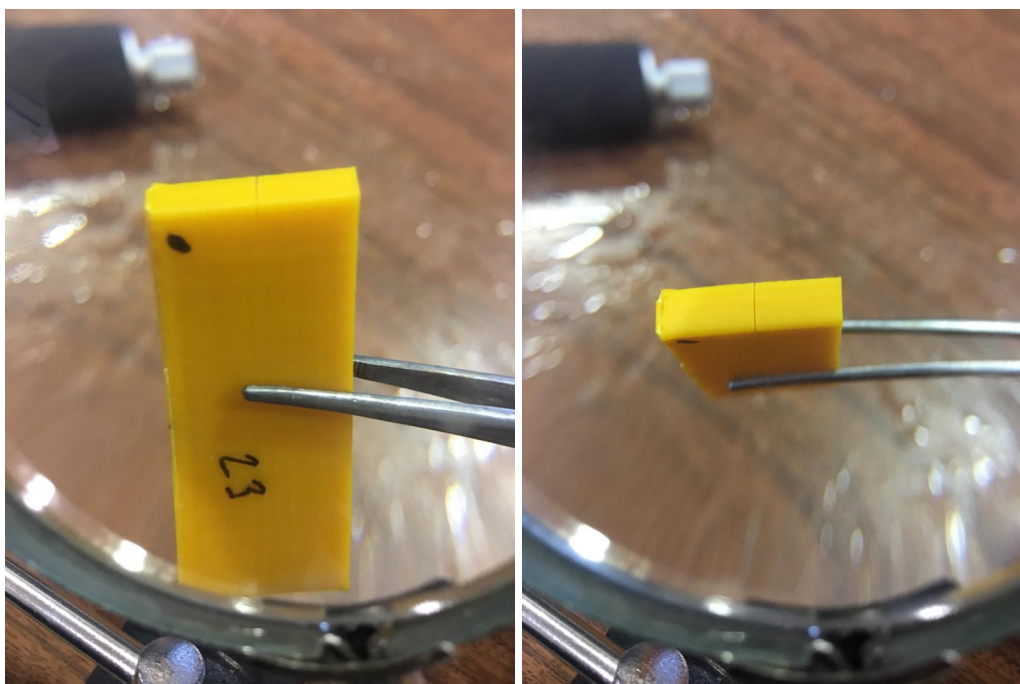


Figura 3.22: Peça em ABS fissurada

Este acontecimento demonstra que o material ABS não é capaz de suportar física e termicamente, as condições impostas para esta dissertação, restando apenas duas opções de material de impressão viáveis, o PETG e o PLA.

Observando a tabela 3.8, verifica-se que as barras apresentam CET's mais baixos. Uma vez que o molde final se assemelha a um cilindro, são os CET's destes que se devem realçar, mais especificamente peças como a amostra #8, pois contêm uma configuração gyroid com preenchimento de 50% e uma impressão na horizontal. Podemos concluir também que o PETG apresenta uma performance ligeiramente melhor que o PLA.

Portanto para um molde de PETG, com geometria semelhante ao molde final, a opção

otimizada é uma impressão na horizontal, com um preenchimento de 50% e com um padrão gyroid. A configuração é a mesma, se se escolher imprimir com PLA, o que nos obriga a pesar outros pontos de decisão, como os custos envolvidos em cada material. Comparando o PLA e o PETG, o PETG foi o que exibiu uma melhor performance, embora com uma margem mínima e como esperado após a revisão literária dos materiais a ensaiar. Ainda que, se olharmos para os custos de um e do outro, o PLA mostra-se menos dispendioso. Sendo que o custo de um filamento de PETG chega a ultrapassar o dobro do valor de um filamento de PLA. O que, nos leva a escolher o PLA, como material de impressão do molde final, e com uma configuração otimizada.

## CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SUPORTE PARA BOBINAS SUPERCONDUTORAS

*Neste capítulo, irão ser apresentados os temas da construção do protótipo final e respetivos ensaios e resultados experimentais. Seguido de uma simulação realizada no Ansys, dissecando e perspectivando as condições de teste.*

### 4.1 Ensaio laboratorial do protótipo final

Resumindo o objectivo do capítulo anterior, este debruçou-se sobre a escolha de um material, padrão e preenchimento de impressão 3D, para construir um suporte para bobinas supercondutoras. A configuração escolhida foi a de uma impressão horizontal, em PLA, com 50% de preenchimento e com um padrão gyroid, como ilustra a amostra #8.

Ora, dependendo da forma do núcleo de ferro em que o suporte irá encaixar, a forma do suporte também variará. Neste caso, o núcleo de ferro escolhido está representado na figura 4.1.

Na figura 4.2, pode-se observar também os crióstatos, com a funcionalidade de conter o azoto líquido e manter a temperatura necessária para a fita estar no estado supercondutor.

Uma vez que as colunas do núcleo apresentam uma forma cilíndrica e a fita supercondutora terá de ser enrolada à sua volta, optou-se por um protótipo do suporte, igual ao da figura 4.4 que, por sua vez, é também bastante parecido ao protótipo apresentado na figura 2.12, sendo este último feito a partir de Celeron.

Para realizar os testes experimentais dos moldes construídos, foi colocado azoto líquido num recipiente de esferovite, com uma altura suficiente para submergir os moldes.

Inicialmente, foi impresso um protótipo para fitas supercondutoras de 4 mm de largura. As medidas do molde foram previamente tiradas antes de ser mergulhado em azoto líquido. Após uma submersão de 2 horas, o molde foi novamente medido. De modo a se



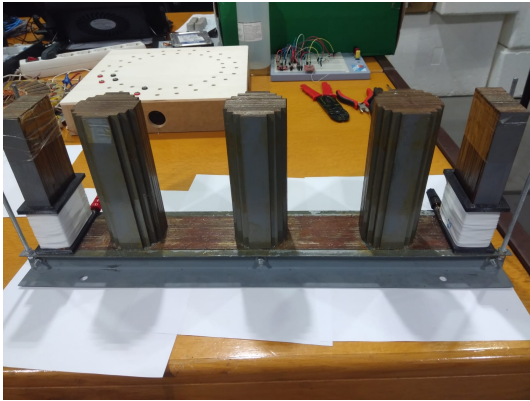


Figura 4.1: Núcleo de ferro

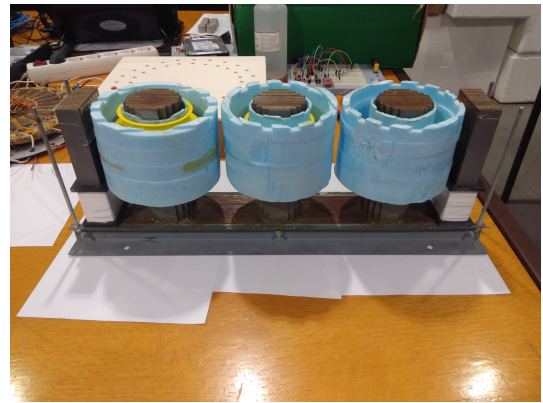


Figura 4.2: Núcleo de ferro com três criostatos

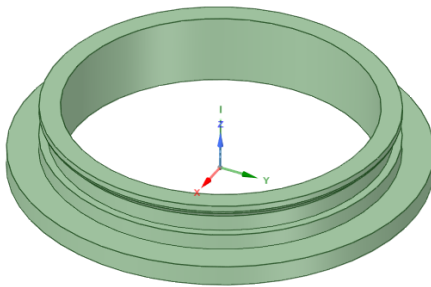


Figura 4.3: Molde projetado no ANSYS



Figura 4.4: Primeiro molde final impresso

perceber melhor como se procedeu à medição deste protótipo, são apresentados nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7, os pontos medidos e o instrumento utilizado para realizar as medições.

Posteriormente aos ensaios do primeiro molde de teste, reparou-se que a espessura da cava de encaixe da fita (c.e.f.), poderia ser reduzida. Quanto menor for esta espessura, menos material se gasta, inclusivé menos fita supercondutora, uma vez que para o mesmo número de espiras, o perímetro é menor. Tendo um volume menor, torna-se mais fácil de colocar o molde em equilíbrio térmico. Portanto houve uma necessidade de testar o quanto essa espessura poderia ser reduzida, sem impactar na performance mecânica que o molde inicial mostrou, mantendo assim a contração do material reduzida e a forma que lhe foi dada.

Por isso, foram produzidos e testados mais 3 moldes. Cada um com uma espessura da cava de encaixe da fita diferente e a variar entre 1 mm e 3 mm. Estes moldes passaram a ter também uma largura da cava de encaixe da fita de 12 mm, para se poder colocar uma fita dessa mesma largura e levando o molde a um novo comportamento estrutural, visto que torna-o mais alto e, possivelmente, mais frágil.



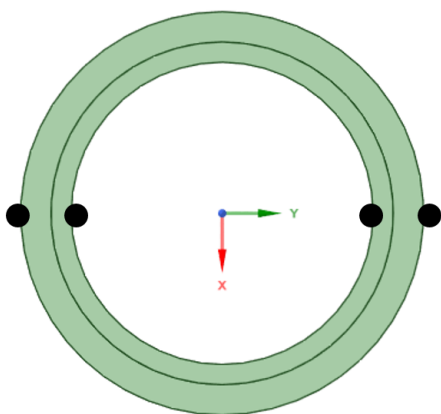


Figura 4.5: Pontos de medição do molde (vista de cima)

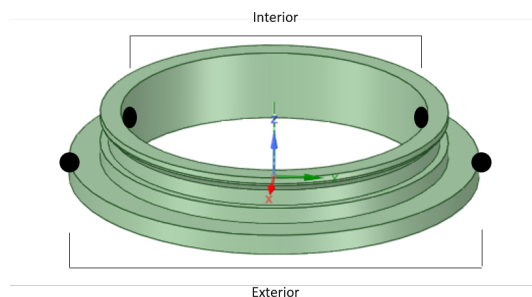


Figura 4.6: Pontos de medição do molde (interior e exterior)

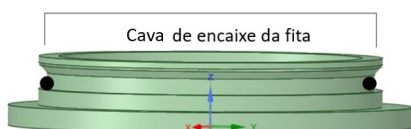


Figura 4.7: Pontos de medição, da cava de encaixe da fita, do molde



Figura 4.8: Medição da distância entre os pontos estipulados com o auxílio de um paquímetro

Nas figuras 4.9 e 4.10, observam-se seis peças, das quais três são uma adaptação de um cilindro totalmente fechado e, três contém uma abertura parcial. Esta abertura foi implementada de modo a se obter um molde operacional, isto é, de forma a se integrar com uma máquina de solda. Estas peças com abertura irão ser melhor abordadas, na secção seguinte.



Figura 4.9: Os três moldes sem abertura



Figura 4.10: Os três moldes com abertura

## 4.2 Resultados experimentais

Como descrito na secção 4.1, os moldes finais foram mergulhados em azoto líquido, de modo a se perceber se o facto dos moldes de PLA terem uma estrutura diferente, impactava ou não no desempenho dos mesmos durante os ensaios.

As tabelas de seguida apresentadas, expõem as medições obtidas antes e depois da submersão em azoto líquido, permitindo tirar conclusões acerca da performance de cada molde.

Tabela 4.1: Medições iniciais do primeiro protótipo

Largura da Cava de Encaixe da Fita [mm]	Interior do Molde [mm]	Exterior do Molde [mm]
4	74,58	99,85

No caso do primeiro protótipo, presente na figura ( 4.11), pode observar-se um ligeiro defeito na impressão do molde, pelo que para se produzir algo através de impressão 3D, é preciso ter em conta os erros de impressão que esta tecnologia pode acarretar. Dependendo muito do material e, principalmente, da impressora, existe sempre um pequeno desvio daquilo que é projetado em computador para aquilo que, na verdade, é impresso. Uma vez que, a precisão de uma impressora 3D é cerca de 1 mm.

Esta deformação que ocorreu, justifica-se com alguns erros comuns que foram cometidos durante a impressão do molde. Pode ter sido: a calibração da mesa, que não permitiu

uma boa aderência do material à mesma; ou a temperatura da mesa provavelmente, estava demasiado elevada, o que levou a uma contração das camadas exteriores, quando o molde passou pelo processo de arrefecimento.



Figura 4.11: Primeiro molde final com defeito de impressão na sua base

As dimensões do molde, foram, inicialmente, projetadas para 75 mm de diâmetro da circunferência interior e 100 mm de diâmetro relativamente à circunferência exterior, mais informações são apresentadas nos anexos (I). Podemos comprovar os erros de impressão, nas medidas iniciais de cada molde, presentes nas tabelas 4.1, 4.3 e 4.5 correspondentes aos outros moldes. O erro de impressão é cerca de 1 milímetro no diâmetro interior e no exterior, o que corresponde a uma percentagem de erro entre os 0,14% e os 1,3%.

Na tabela 4.2 é de notar as dimensões atingidas após 2 horas de submersão em azoto líquido e a percentagem de contração do material.

Tabela 4.2: Medições e percentagens de contração, após duas horas de submersão em azoto líquido

Largura da Cava de Encaixe da Fita [mm]	Interior do Molde		Exterior do Molde	
	mm	% de contração	mm	% de contração
4	73,66	1,234	98,90	0,951

Analisando a tabela, verifica-se que se obteve uma percentagem de contração de 1,234% no diâmetro interior do molde e de 0,951% no diâmetro exterior. Estas percentagens, correspondem, respetivamente, a  $5,59 \times 10^{-5}$  e  $4,46 \times 10^{-5}$  CET's.

#### CAPÍTULO 4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SUPORTE PARA BOBINAS SUPERCONDUTORAS

Após estes resultados, considera-se que o material, apesar de apresentar uma ligeira deformação, mostrou resistência térmica e mecânica, tendo uma ótima performance. Não apresentou nenhuma fratura visível a olho nu, correspondendo assim ao resultado esperado.

Concluiu-se os ensaios ao molde de quatro milímetros de largura da cava de encaixe da fita (c.e.f.) e passa-se a testar o quanto afeta a espessura dessa mesma região de encaixe. Consideraram-se três medidas (1, 2 e 3 mm) e aumentou-se a largura da cava para 12 mm.

Os três moldes que foram testados de seguida, consideram-se os moldes otimizados, devido a todos os ensaios anteriores. Estes moldes são compactos e sem abertura, logo mais robustos, como ilustrado na figura 4.12.



Figura 4.12: Um dos moldes sem abertura

Na tabela 4.3, observam-se as medidas iniciais dos três moldes sem abertura, com a adição das dimensões do diâmetro da cava de encaixe da fita. Estas foram projetadas para 76, 78 e 80 mm, de modo a que cada uma tenha, gradualmente, 1 mm de diferença na espessura da cava de encaixe.

Tabela 4.3: Medições iniciais dos três moldes sem abertura

Nº	Espessura da C.E.F. [mm]	Largura da C.E.F. [mm]	Interior do Molde [mm]	C.E.F [mm]	Exterior do Molde [mm]
#1	1	12	74,00	76,31	99,22
#2	2	12	74,16	78,43	99,34
#3	3	12	74,45	80,47	99,65

De seguida na tabela 4.4, mostram-se os valores obtidos posteriormente aos moldes terem sido mergulhados em azoto líquido, durante 2 horas e 30 minutos, assim como, a percentagem de contração do material.

Tabela 4.4: Medições e percentagens de contração, após duas horas e trinta minutos de submersão em azoto líquido (#1, #2 e #3)

Nº	Espessura da C.E.F. [mm]	Interior do Molde		Cava de Encaixe da Fita		Exterior do Molde	
		mm	% de contração	mm	% de contração	mm	% de contração
#1	1	73,21	1,0676	75,66	0,8518	98,44	0,7861
#2	2	73,36	1,0787	77,57	1,0965	98,46	0,8858
#3	3	73,69	1,0208	79,49	1,2178	98,62	1,0336

Analisando a tabela 4.4, constata-se que os três moldes otimizados apresentaram uma boa performance, destacando-se a amostra número 1. Esta exibiu percentagens de contração de 1,0676% no diâmetro interior, 0,8518% no diâmetro da região c.e.f. e 0,7861% no do exterior. Estas percentagens correspondem a CET's de  $4,94 \times 10^{-5}$  no interior,  $4,02 \times 10^{-5}$  na c.e.f. e  $3,54 \times 10^{-5}$  no exterior.

Depreende-se que, os resultados obtidos não podiam ter sido melhores, uma vez que, a amostra que teve uma melhor performance é também, a que tem uma menor cava de encaixe da fita, o que implica um menor gasto de material. Concluindo com as vantagens, relativamente à impressão do molde eleito, é de realçar que, apesar de exígua, existe uma redução de material necessário e, consequentemente, do tempo de impressão, comparativamente às outras duas opções.

Prosseguindo os ensaios, desta vez projetando uma abertura no molde, observe-se na tabela 4.5, as medidas iniciais dos três moldes com abertura, tendo estes sido configurados de igual forma aos três moldes sem abertura, apenas com essa pequena diferença estrutural.

Estes moldes são considerados os moldes operacionais, uma vez que a abertura foi planificada de modo a se encaixar numa máquina de solda, também produzida por impressão. Essa máquina foi produzida pelo co-orientador, Doutor Roberto de Oliveira, de acordo com um dos processos de soldadura utilizados no Instituto da Ciência dos Materiais de Barcelona (ICMAB).

Na figura 4.14, pode observar-se uma simulação de soldadura de uma fita supercondutora 2G, através de células de Peltier. Estas células atingem temperaturas antagónicas nas suas duas faces. A fita é enrolada no suporte impresso e colocada entre as células de Peltier, deste modo entra em contacto com a cerâmica, presente nas células, com temperatura suficiente para fundir o estanho, utilizado na soldadura.

Na tabela 4.6, são apresentadas as medições obtidas, após os moldes serem mergulhados em azoto líquido durante 2 horas e 30 minutos assim como, a percentagem de contração do material.



Figura 4.13: Um dos moldes com abertura

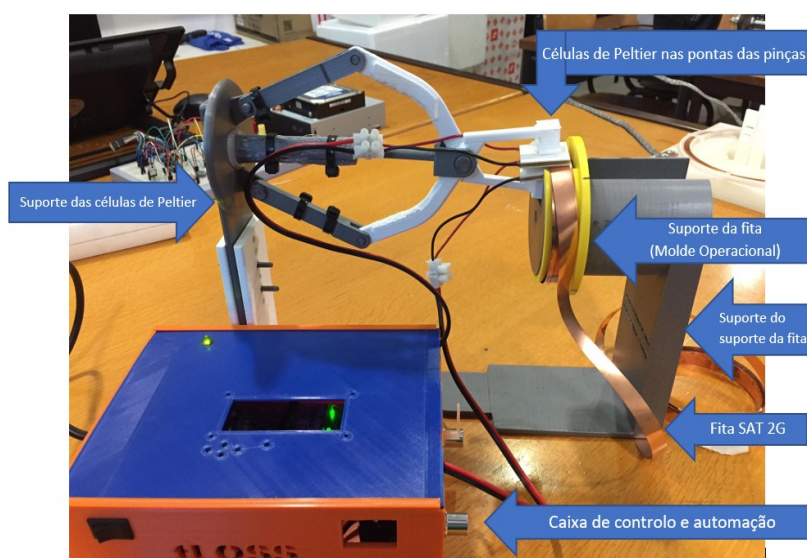


Figura 4.14: Configuração e composição da máquina de solda em conjunto com o molde operacional impresso



Tabela 4.5: Medições iniciais dos três moldes com abertura

Nº	Espessura da C.E.F. [mm]	Largura da C.E.F. [mm]	Interior do Molde [mm]	C.E.F. [mm]	Exterior do Molde [mm]
#4	1	12	74,00	76,30	99,54
#5	2	12	74,12	78,50	99,86
#6	3	12	74,15	80,59	99,34

Tabela 4.6: Medições e percentagens de contração, após duas horas e trinta minutos (#4, #5 e #6)

Nº	Espessura da C.E.F. [mm]	Interior do Molde		Cava de Encaixe da Fita		Exterior do Molde	
		mm	% de contração	mm	% de contração	mm	% de contração
#4	1	73,19	1,0946	75,40	1,1796	98,69	0,8539
#5	2	73,35	1,0389	77,65	1,0828	98,77	1,0915
#6	3	73,14	1,3621	79,50	1,3525	98,33	1,0167

Examinando os resultados atingidos, pode concluir-se que, a performance encontra-se dentro dos padrões esperados para as três amostras, mas a número 5 evidenciou-se apresentando percentagens de 1,0389% de contração no diâmetro interior, 1,0828% no diâmetro da cava de encaixe da fita (c.e.f.) e 1,0915% no do exterior. Estas percentagens representam CET's de  $4,78 \times 10^{-5}$  no diâmetro interior,  $5,01 \times 10^{-5}$  no da c.e.f. e  $5,05 \times 10^{-5}$  no do exterior.

O resultado foi bastante positivo, apesar da melhor amostra ser a que possui 2 mm de espessura da cava de encaixe. Visto que o espaçamento em questão é pouco significativo, é de se notar a excelente performance que estes moldes exibiram.

#### 4.2.1 Simulação das condições de teste com apoio de modelos numéricos

Nesta secção, simula-se e apresenta-se com mais detalhe os resultados experimentais, através do software ANSYS. Aproveitaram-se os dados obtidos pelos ensaios e inseriram-se num modelo numérico por computador.

As simulações foram efetuadas com auxílio do software Discovery Live 2020 R2 (Student) pertencente ao pacote do ANSYS. O objetivo desta simulação passa pela necessidade de se poder observar de forma contínua, a deformação do molde, simulando as mesmas condições de teste.

Determinou-se uma região de contração e aplicou-se uma tensão na direção radial. Adotou-se um modelo dinâmico de contração, através das medidas diretas que serviram de entrada à simulação como o volume e a área, a deformação em milímetros, o material e a temperatura. E medidas indiretas, como a pressão que determina a tensão aplicada.

Através da figura 4.15, é possível observar a região onde foi aplicada uma pressão.

## CAPÍTULO 4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SUPORTE PARA BOBINAS SUPERCONDUTORAS

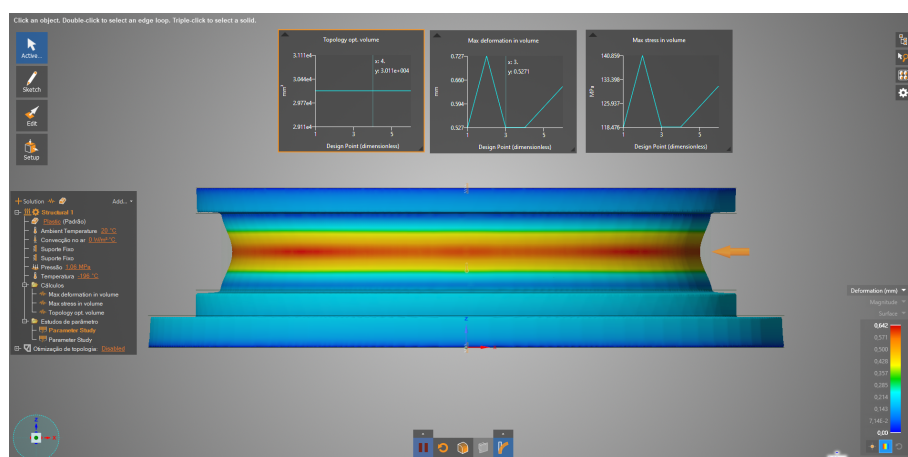


Figura 4.15: Simulação de um molde com 1 milímetro de espessura na região assinalada

Depois de introduzidos todos os valores, obtidos diretamente dos resultados experimentais, foi necessário descobrir qual o valor de pressão aplicada no molde, de maneira a que este se deforme, apenas, 0,65 mm. Este valor de deformação é o valor correspondente à diferença entre as distâncias obtidas antes e depois da submersão do molde (de 1 mm de espessura) em azoto líquido, conforme as tabelas 4.3 e 4.4.

Considera-se esta simulação fiável, uma vez que os dados de entrada derivam dos resultados experimentais e usaram-se as ferramentas de análise disponibilizadas por um dos softwares, de análises multifísicas, mais utilizados do mundo [45]. Temos o modelo projetado em 3D com o volume e área respetivos; a deformação que corresponde à diferença, em milímetros, entre a medida de comprimento inicial e a medida após a submersão em azoto. Relativamente, à temperatura, acredita-se que por terem estado mergulhadas em azoto líquido por mais de duas horas, atingiram o equilíbrio térmico, num ambiente criogénico. O material estipulado foi um plástico, tendo sido, o PLA, o produto dos resultados experimentais realizados, anteriormente, nesta dissertação.

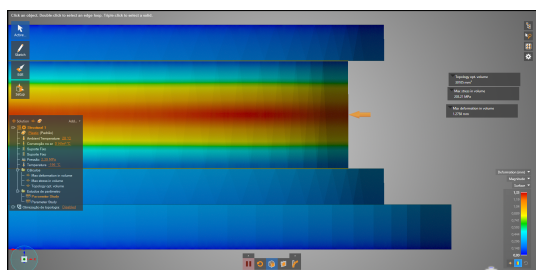


Figura 4.16: Molde com geometria inicial

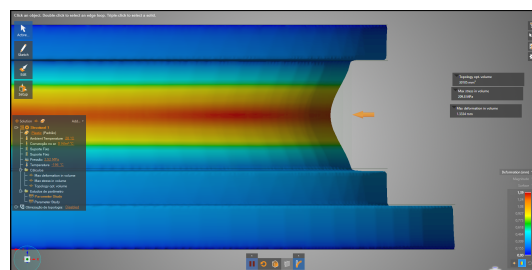


Figura 4.17: Molde com geometria deformada, após aplicada uma pressão

Constata-se, desde já, que as figuras 4.16 e 4.17 não estão apresentadas à escala real, isto para, se conseguir captar melhor a deformação atingida. É de realçar que, se o molde



com a bobina estiverem colocados no núcleo de um transformador, a deformação esperada nas imagens será mais diminuída, pois o acoplamento destas peças origina uma maior robustez no suporte.

Nos gráficos das figuras 4.18 até à 4.28, foi possível simular os dados transitórios até se atingir a deformação esperada, que neste caso, é a deformação máxima obtida, pelo molde de melhor performance.

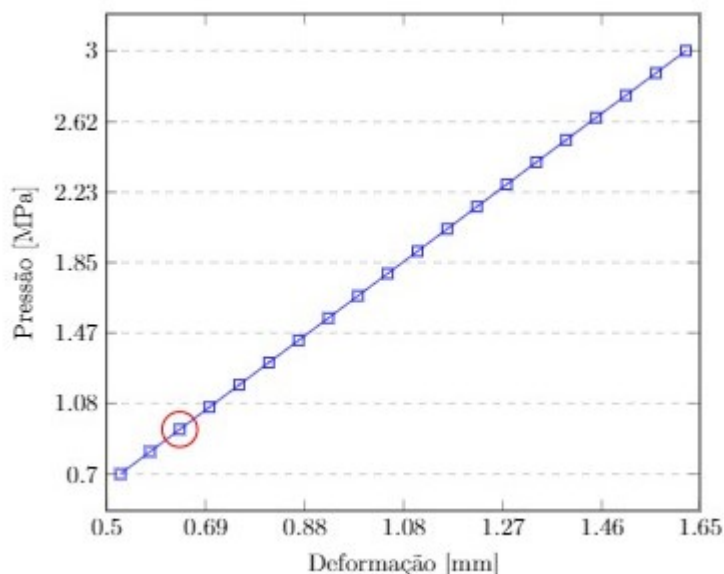


Figura 4.18: Variação da Deformação [mm], do molde de 1 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Pressão [MPa]

No gráfico da figura 4.18, percebe-se um estudo e uma extrapolação da deformação do molde, para um aumento de pressão até aos 3 MPa. A simulação foi estipulada em 20 passos desde os 0,7 MPa aos 3 MPa. O ponto assinalado pela circunferência vermelha indica o valor de pressão a que se chegou, de 0,942 MPa para uma deformação de 0,642 mm - deformação atingida nos ensaios laboratoriais, mais precisamente, corresponde à diferença entre os milímetros finais e iniciais da cava de encaixe da fita.

O gráfico, que consta na figura 4.19 é o resultado da simulação, que permite observar a deformação do molde ao longo da diminuição de temperatura. Uma vez que os moldes se encontram submersos durante o processo, não seria possível captar estes dados transitórios da deformação através de micrómetros e paquímetros, nem mesmo traçar a temperatura correspondente, dado que, a ponta do sensor de temperatura do termómetro Fluke 287, encontrar-se-ia, também, mergulhada em azoto líquido e mediria a temperatura do fluído e não do molde.

Observando as figuras 4.16 e 4.17 e os gráficos das figuras 4.18 e 4.19, verifica-se que este modelo dinâmico de contração, apresenta alguma riqueza nos detalhes, algo que com uma abordagem analítica ou através de medidas experimentais, como foi o caso, não se obtém. Apenas se se recorresse ao uso de extensómetros, poder-se-ia acompanhar a variação da deformação, isto se estes estivessem a adquirir os dados continuamente. O

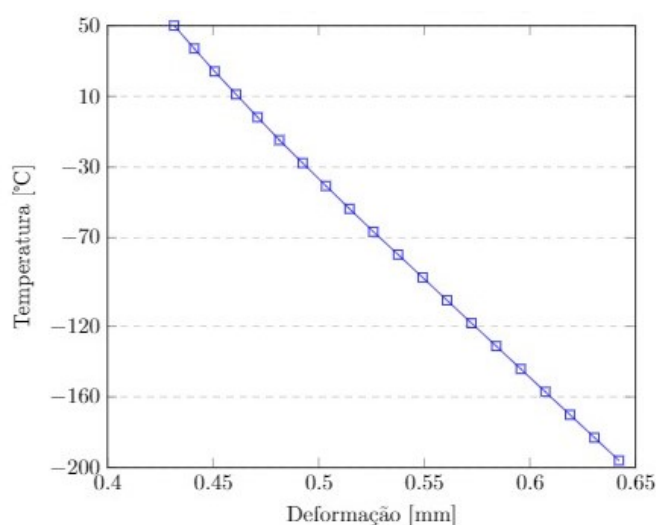


Figura 4.19: Variação da Deformação [mm] do molde, de 1 mm de espessura da cava de encaixe da fita em função da Temperatura [°C]

detalhamento passa por, não só saber os valores, ao longo tempo, da deformação e da pressão aplicada, como também, uma pré-visualização de como a peça deformaria com certas condições de teste.

Para uma melhor visão sobre o interior do molde, foi efetuado um corte de uma secção. Visualizando apenas metade do molde, foi possível observar o comportamento do interior do molde, assim como a deformação na região da cava. Pelo que, com 1 mm de espessura da cava, a deformação é mais uniforme ao longo dessa espessura. Nos moldes com 2 e 3 mm de espessura, existe uma maior resistência mecânica, o que faz com que, consequentemente, a deformação não seja homogênea.

Importa dizer, que relativamente a todas a figuras desta secção que apresentem uma escala de azul a vermelho, o valor mais alto da escala (a vermelho) corresponde à deformação atingida nos ensaios laboratoriais, de modo a que a simulação e extrapolação dos valores de pressão fossem o mais aproximados da realidade.

Este tipo de simulação foi igualmente retirada para os moldes com 2 e 3 mm de espessura da cava, para que fosse possível comparar as suas regiões e observar como se comporta o molde, nesta situação, quando a espessura da cava é maior.

Verificou-se que, com o aumento da espessura da cava de encaixe, consequentemente, ocorre uma diminuição da faixa vermelha, mais notável na figura 4.20. A região torna-se mais amarelada, significando que a peça possui uma maior resistência mecânica, tornando a deformação não uniforme. Isto é, a face interior mostra-se menos afetada pela pressão do que a face exterior.

Corroborando o que já foi constatado acerca das figuras 4.20 e 4.21, a imagem 4.22 mostra o comportamento interno do molde com 3 mm de espessura da cava de encaixe da fita. Repare-se que a região em que se aplica uma pressão, apresenta-se bastante amarela, quando comparada com as demais.

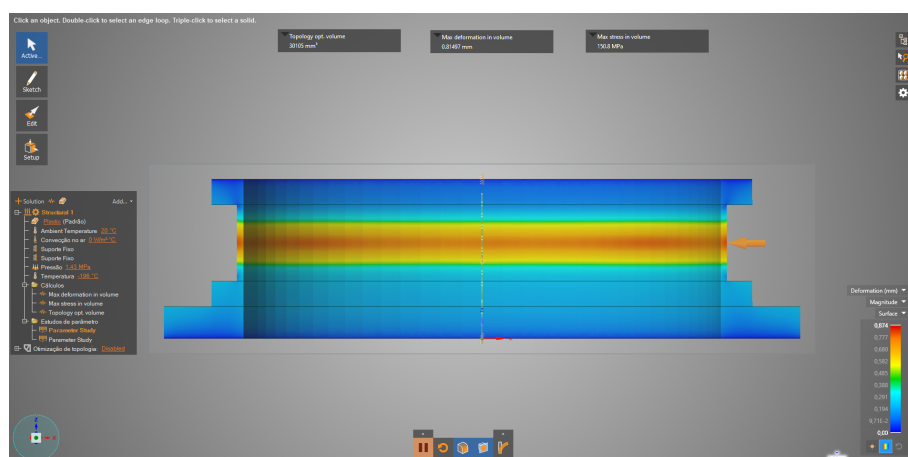


Figura 4.20: Secção da metade do molde com um milímetro de espessura

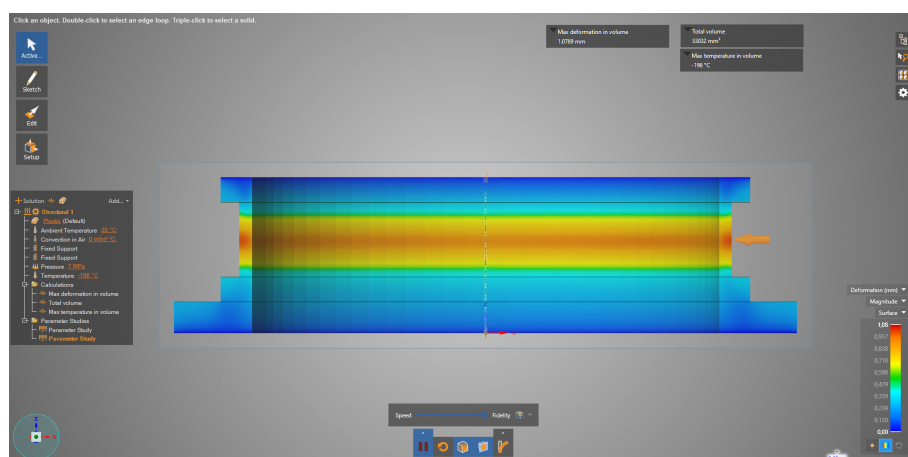


Figura 4.21: Secção da metade do molde com dois milímetro de espessura

É um facto que o aumento da espessura da cava de encaixe, oferece uma maior robustez ao molde. Não obstante de ser uma característica exibida pelo molde seleccionado, é necessário ter em conta outros parâmetros, no âmbito desta dissertação. Como já se referiu, uma menor espessura da cava é considerada preferencial, pois para além de continuar a oferecer robustez ao molde, implica um gasto menor de material.

Tirando vantagem das ferramentas disponibilizadas pelo software, foi simulada uma otimização geométrica do molde, através de um modelo numérico. Para esta simulação, foram impostas restrições na deformação máxima e na distância de protecção. Isto é, a deformação máxima foi definida para um máximo de contração de volume de 10 % e a distância máxima permitida de remoção de material ficou definida para 2,87 mm. Estes valores foram considerados para que o molde não se degradasse, apesar de a percentagem de contração nunca ter ultrapassado os 10 %, nos ensaios laboratoriais. As figuras 4.23 e 4.24 espelham todo este cenário.

Após a redução de material utilizado, para impressão do molde, deduz-se que o volume foi reduzido de 30105 mm<sup>3</sup> para 27092 mm<sup>3</sup>, ou seja, aproximadamente, 10% de

## CAPÍTULO 4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SUPORTE PARA BOBINAS SUPERCONDUTORAS

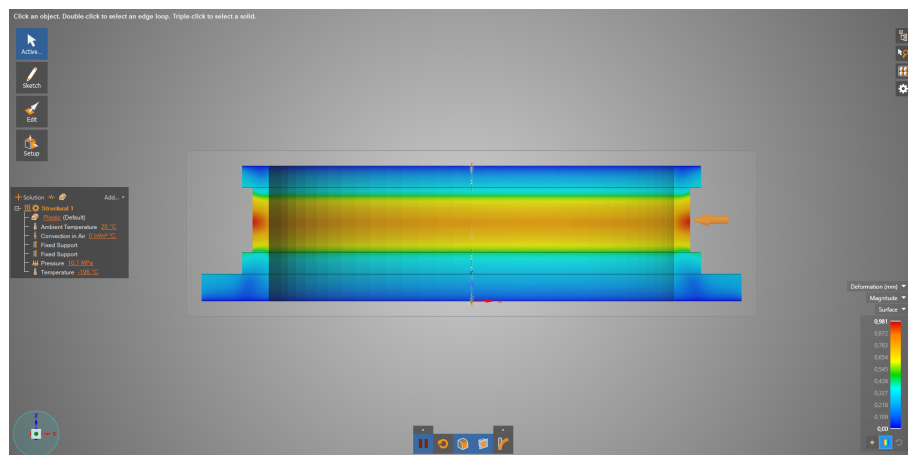


Figura 4.22: Secção da metade do molde com 3 mm de espessura

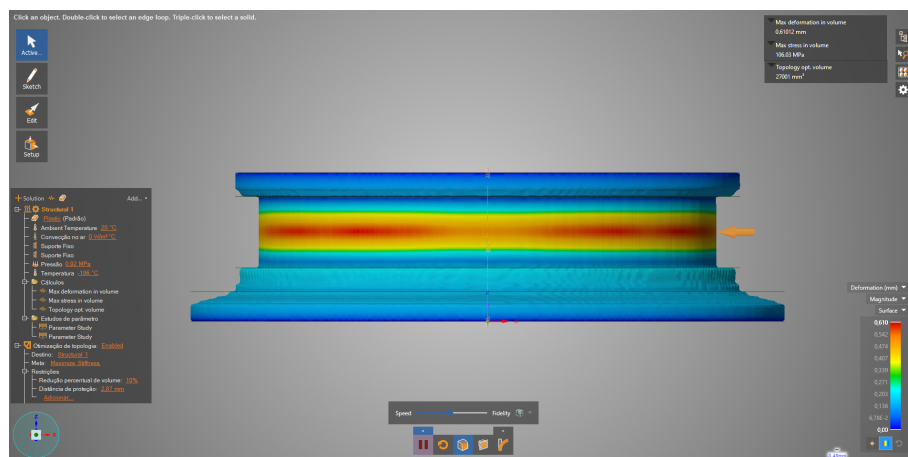


Figura 4.23: Otimização geométrica simulada, com remoção de material até 10%

redução. Esta simulação foi um sucesso, uma vez que o molde se manteve intacto e sem quebras e se obteve uma redução de material, o que nos leva a uma impressão mais rápida e menos dispendiosa, mas, igualmente robusta.

O gráfico da figura 4.25, apresenta uma extrapolação da deformação do molde, para um aumento de pressão até aos 7 MPa. Foram percorridos 20 passos, desde os 4 MPa aos 7 MPa. O ponto assinalado pela circunferência vermelha indica o valor de pressão necessária para se deformar o molde de 2 mm de espessura da cava, com uma deformação de 0,86 mm. Valor que corresponde a 5,54 MPa.

Relativamente à simulação do molde de 2 mm, importa ainda realçar os dados transitórios entre a sua forma inicial e a sua posterior deformação, ao longo da diminuição da temperatura.

Para se recolher informações do molde de 3 mm de espessura da cava, observe-se os gráficos apresentados nas figuras 4.27 e 4.28.

A partir do gráfico da figura 4.27, assinalado pela circunferência vermelha, verifica-se que para uma deformação de 0,98 mm, foi necessária uma pressão de 10,7 MPa. Assim

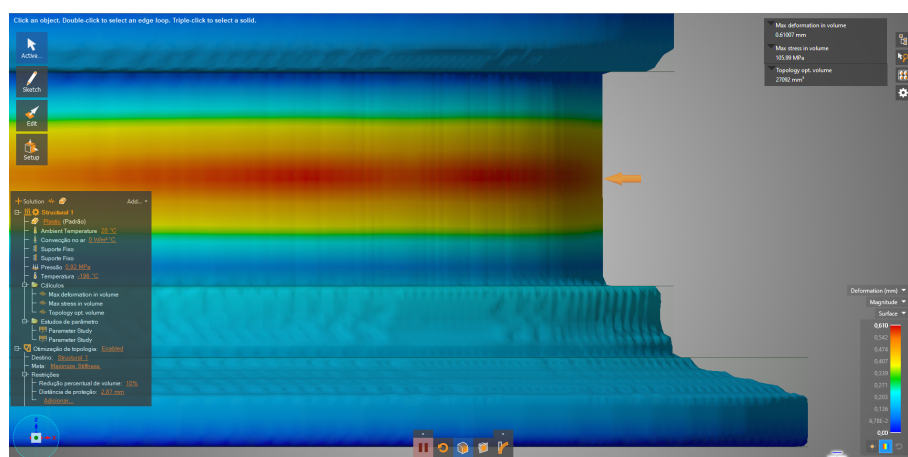


Figura 4.24: Otimização geométrica, com vista aproximada

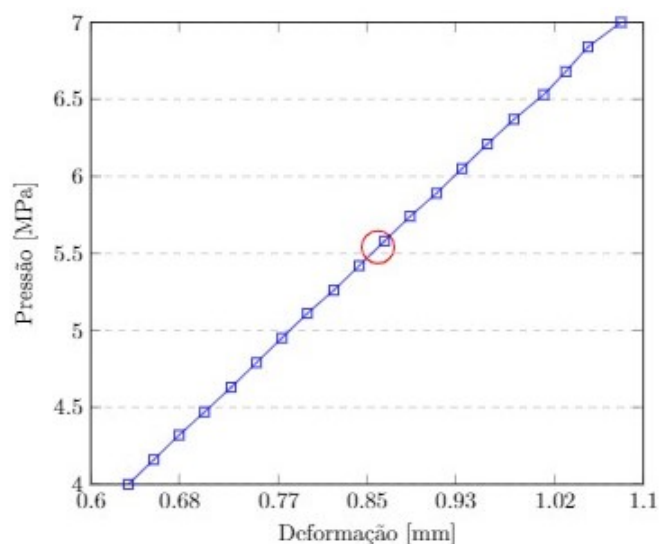


Figura 4.25: Variação da Deformação [mm], do molde de 2 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Pressão [MPa]

como, se simulam os valores de deformação para uma variação de pressão dos 10 MPa aos 14 MPa.

Assim como, nos outros gráficos da variação da deformação em função da temperatura, a figura 4.28 apresenta os valores da deformação do molde de 3 mm de espessura da cava, numa análise contínua ao longo da diminuição da temperatura.

Relativamente aos moldes com abertura, serão apresentadas as paredes interiores dos mesmos e comentadas as pressões necessárias para deformar o molde como esperado.

Observando as imagens 4.29, 4.30 e 4.31, retira-se que, efetivamente, a região foi ficando menos avermelhada com o aumento da espessura, e as pressões calculadas para se atingir as deformações atingidas nos ensaios, com valores menores. Posto isto, num molde com uma abertura, é necessário uma menor pressão para deformar o molde do que num molde sem abertura.

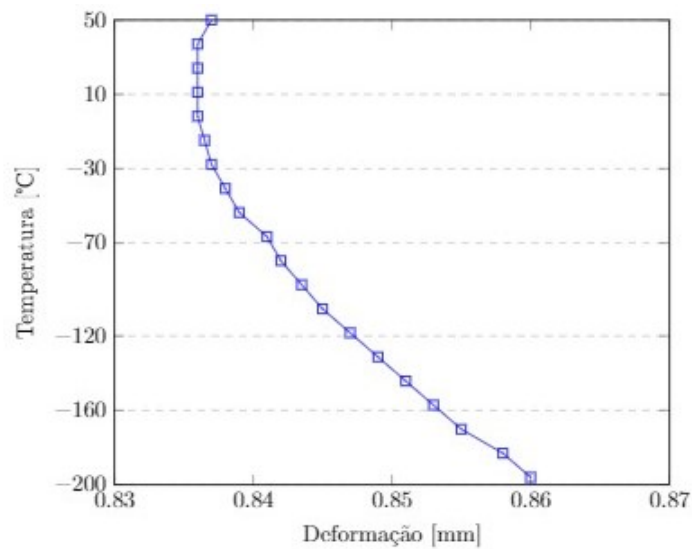


Figura 4.26: Variação da Deformação [mm], do molde de 2 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Temperatura [°C]

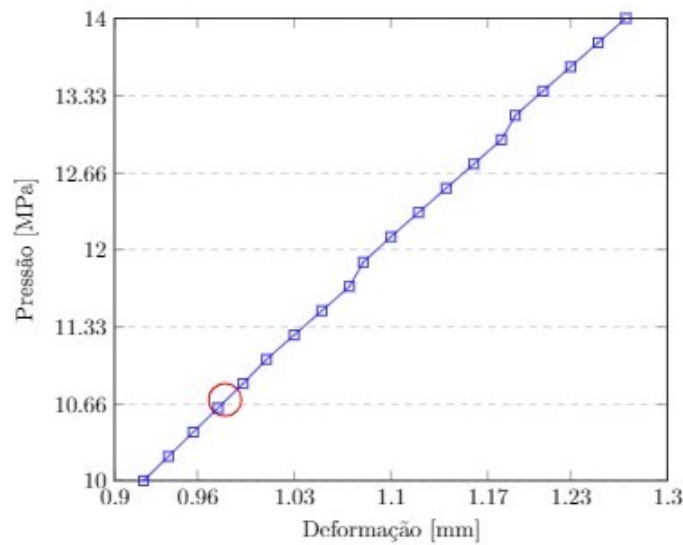


Figura 4.27: Variação da Deformação [mm], do molde de 3 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Pressão [MPa]

Relativamente aos moldes com abertura e numa abordagem operacional, o molde que contém uma espessura de 2 mm, foi o que obteve melhores resultados, com a adição de que apresenta uma maior robustez comparativamente ao molde de 1 mm. Tendo sido o molde de 1 mm, aquele que teve melhor prestação antes de se otimizar estruturalmente.



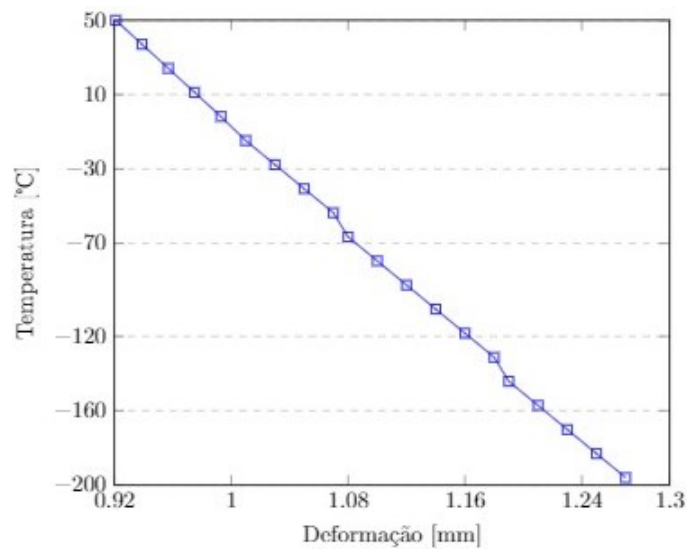


Figura 4.28: Variação da Deformação [mm], do molde de 3 mm de espessura da cava de encaixe da fita, em função da Temperatura [°C]

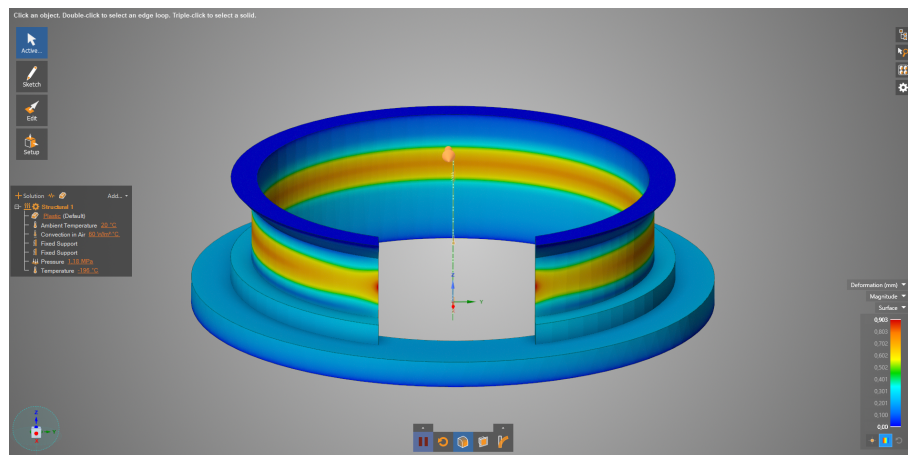


Figura 4.29: Parede interior do molde com 1 mm de espessura da cava

Os modelos numéricos usados nesta dissertação, exibiram resultados de pressão e de tensão, aplicados na região da cava de encaixe da fita, apresentada nas figuras presentes nesta secção. Pode-se usar esses dados para simular outras geometrias, nas mesmas condições, e conhecer o seu comportamento mecânico, sem recorrer a ensaios laboratoriais. Pelo que, se considera esta abordagem como uma pequena contribuição, que permite uma maior facilidade, no teste de materiais em ambientes criogénicos, e importante também para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO SUPORTE PARA BOBINAS SUPERCONDUTORAS

---

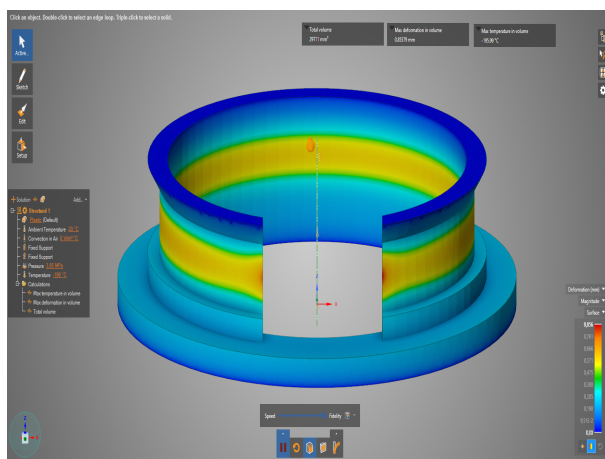


Figura 4.30: Parede interior do molde com 2 mm de espessura da cava

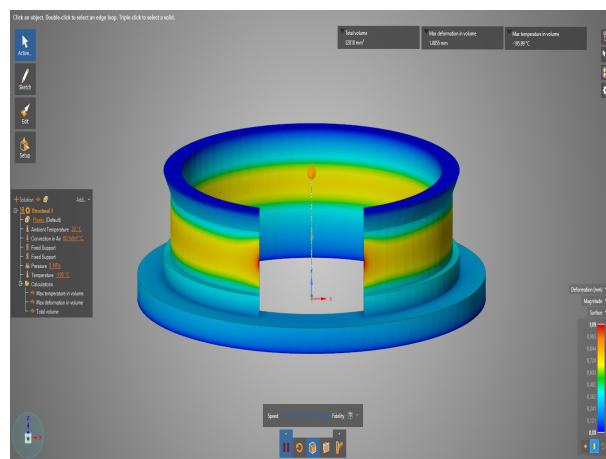


Figura 4.31: Parede interior do molde com 3 mm de espessura da cava



## CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

*Nesta fase final, interessa apresentar as considerações pertinentes relativamente à escolha do material, do molde e das otimizações praticadas. Assim como, prever o trabalho futuro a ser desenvolvido, para se contribuir para uma maior e melhor informação possível, acerca deste tema.*

### 5.1 Conclusões e considerações finais

Uma vez que, a prototipagem e produção de moldes sofreu avanços tecnológicos, considerou-se pertinente melhorar o custo de produção, evitar desperdícios e atingir a máxima resistência termo-mecânica, dentro dos materiais selecionados para o estudo, através da mais recente tecnologia - a impressão 3D.

Numa fase inicial, realizou-se uma pesquisa sobre a impressão 3D, escolhendo alguns dos materiais presentes nesta tecnologia para objeto de estudo e retirando informações de métodos e máquinas de impressão. Foi necessária uma pesquisa na área de ambientes criogénicos, a qual remeteu para que se fizesse uma análise à deformação adquirida pelos materiais, quando em contacto com estes ambientes. Tudo isto descrito no Revisão Literária, capítulo 2.

Após se recolher a informação necessária, foram postos em prática os ensaios laboratoriais às peças previamente projetadas. Estes primeiros ensaios, refletiram uma das principais etapas desta dissertação. Chegou-se a uma configuração de impressão, que se considerou ideal, para estas condições. Essa configuração é apresentada como a impressão horizontal de um molde de PLA, com 50% de preenchimento e com um padrão gyroid, como se descreve no capítulo 3.

Com o consenso, relativamente à configuração do molde, partiu-se para a prototipagem e produção de um molde adequado à aplicação. Produziu-se, primeiramente, apenas um molde, o qual foi testado e o resultado foi positivo, permitindo possíveis otimizações e melhorias. Começou-se por aumentar a largura da região de encaixe da fita para que suportasse fitas de 12 mm. De seguida, fez-se uma abertura no molde, de modo a que este permitisse a utilização de uma máquina de solda. Dos moldes operacionais, o que revelou um melhor desempenho, foi o molde com espessura de 2 mm. Talvez, devido à abertura que foi feita, o molde necessite de um suporte maior na cava de encaixe da fita.

Após analisar todos os resultados, chegou-se à conclusão de que, o molde sem abertura, de 1 mm de espessura da cava de encaixe da fita, foi o candidato favorito, apresentando o melhor desempenho em termos mecânicos. Houve necessidade de extrapolar e poder escalar o trabalho feito até agora, por isso simulou-se o molde ideal, em modelos numéricos computacionais. Através desta abordagem, foi possível obter valores de pressão e tensão para simular os testes criogénicos, para que se poupe em recursos que poderão ser necessários a outras experiências e que se poupe, também, em tempo de procedimento experimental. Para além disso, obteve-se uma simulação dos dados transitórios da deformação dos moldes e uma extrapolação da pressão que provoca essa mesma deformação. Permitiu também, obter uma projeção de um molde geometricamente otimizado, com redução de 10% de volume e, igualmente, resistente às condições de teste.

## 5.2 Perspetivas de desenvolvimento futuro

Apesar de esta dissertação ter atingido o seu foco principal, ainda carece de algumas pesquisas e trabalhos futuros, de modo a facilitar este tipo de experiências e estudos laboratoriais em ambientes criogénicos.

Uma vez que, dois dos três materiais, que se pesquisaram e se selecionaram, tiveram uma ótima prestação. Acredita-se que hajam mais materiais, passíveis de serem impressos, e que se comportem positivamente, nestes ambientes criogénicos. É necessária uma investigação, no sentido de aumentar o espectro de materiais conhecidos, nestas condições de teste. Assim como, que se contribua para o aumento de informação, relativa a protocolos de ensaios laboratoriais e métodos de medições em ambientes criogénicos.

Com a escolha do material e da configuração de impressão ideal, foi possível contribuir para o projeto 'tLoss'. Com esta contribuição é agora possível imprimir, reimprimir e otimizar com muito mais facilidade, em laboratório, todo o tipo de moldes, evitando desperdícios e custos desnecessários e aumentando a eficiência do processo de manufatura.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Willis. “The Maker Revolution”. Em: *Computer* 51 (2018), pp. 62–65. DOI: [10.1109/MC.2018.1731074](https://doi.org/10.1109/MC.2018.1731074).
- [2] M. Adamkiewicz e B. Rubinsky. “Cryogenic 3D printing for tissue engineering”. Em: *Cryobiology* 71.3 (2015), pp. 518–521. ISSN: 10902392. DOI: [10.1016/j.cryobiol.2015.10.152](https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2015.10.152). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryobiol.2015.10.152>.
- [3] *Comparação de impressoras 3D*. URL: <https://3dlab.com.br/creality-3d-compare-as-impressoras-da-marca/>.
- [4] K. Hechtel. “DESIGN CONSIDERATIONS FOR THE USE OF PLASTIC MATERIALS”. Em: *Cryogenics Whitepaper - distributed by Curbell Plastics* (2014).
- [5] S. Luís. “Impressão 3D Perspetivas de adoção na Indústria Portuguesa”. Em: *Tese de mestrado. Nova IMS, Univerdade Nova de Lisboa* (2016).
- [6] L. Augusto e M. Dabague. “O PROCESSO DE INOVAÇÃO NO SEGMENTO DE IMPRESSORAS 3D”. Em: *Monografia. Universidade Federal do Paraná* (2014).
- [7] *tecnicaSLA*. URL: [www.KeepCAD.com.br](http://www.KeepCAD.com.br).
- [8] *Manufatura aditiva*.
- [9] *Materiais plásticos a baixas-temperaturas*. URL: <https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semiacabados/selecao-de-material-plastico/baixa-temperatura>.
- [10] M. Molitch-hou. *manufacturing process*. Elsevier Inc., 2018, pp. 1–38. ISBN: 9780128121559. DOI: [10.1016/B978-0-12-812155-9/00001-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9/00001-3). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9/00001-3>.
- [11] *ultimaker2+*. URL: <https://www.impresoras3d.com/pt/produto/Impressora-3d-Ultimateker-2/>.
- [12] *Fortus*. URL: <https://www.stratasys.com/br/3d-printers/stratasys-f900>.
- [13] *3D Printing*. URL: <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingA>.
- [14] *Fabrico de ossos, músculos e orelhas*. URL: <https://canaltech.com.br/ciencia/cientistas-criam-sistema-de-impressao-3d-que-fabrica-ossos-musculos-e-orelhas-57993/>.
- [15] M. Mavri. “Redesigning a Production Chain Based on 3D Printing Technology”. Em: *Wiley Online Library* 22 (3 2015), pp. 141–147.

- [16] *Produção de objeto em chocolate*. URL: <https://www.tecmundo.com.br/curiosidade/11267-impressora-3d-cria-objetos-de-chocolate.htm>.
- [17] *Produção de objeto em chocolate Lenovo*. URL: <https://olhardigital.com.br/noticia/lenovo-anuncia-impressora-3d-de-chocolate/48914>.
- [18] M. D. Tens e M. Cada. “9 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS - DIAGRAMAS TENSÃO-”. Em: *Estrutura e Propriedades dos Materiais* (2016), pp. 126–161.
- [19] <http://www.fastenercomponents.com/news/plastic-mat>.
- [20] Keith Hechtel. URL: <https://www.curbellplastics.com/Discover-Curbell/Biographies/Kenith-Hechtel>.
- [21] *Plásticos modificados*. URL: <https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semiacabados/plasticos-modificados>.
- [22] *Celeron*. URL: <https://www.plastecno.com.br/produtos/celeron/malha-media.html>.
- [23] *Composição da fita supercondutora*. URL: <https://www.superpower-inc.com/>.
- [24] L. W. McKeen. “5 Styrenic Plastics”. Em: *Permeability Properties of Plastics and Elastomers || Styrenic Plastics* (2012). DOI: 10.1016/B978-1-4377-3469-0.10005-0.
- [25] C. V. Pious e S. Thomas. “2 Polymeric Materials - Structure , Properties , and Applications”. Em: *Printing on Polymers, Mahatma Gandhi University* (2016), pp. 21–39. DOI: 10.1016/B978-0-323-37468-2.00002-6.
- [26] J. Philp. “Genomics and the Bioeconomy : Opportunities to Meet Global Challenges”. Em: *Genomics and Society || Genomics and Bioeconomy* (2016), pp. 207–238. DOI: 10.1016/B978-0-12-420195-8.00011-2.
- [27] Y. Byun e Y. T. Kim. *Chapter 14. Bioplastics for Food Packaging: Chemistry and Physics*. Elsevier Ltd, pp. 349–366. ISBN: 9780123946010. DOI: 10.1016/B978-0-12-394601-0.00014-X. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394601-0.00014-X>.
- [28] N. Farmer. *The future : global trends and analysis for the international packaging market in relation to the speed of impact of packaging innovation and likely material changes*. Woodhead Publishing Limited, pp. 288–312. ISBN: 9780857098979. DOI: 10.1533/9780857098979.288. URL: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857098979.288>.
- [29] C. B. Crawford e B. Quinn. *Physiochemical properties and degradation*. 2017, pp. 57–100. ISBN: 9780128094068. DOI: 10.1016/b978-0-12-809406-8.00004-9.
- [30] V. R. Sastri. “Engineering Thermoplastics: Acrylics, Polycarbonates, Polyurethanes, Polyacetals, Polyesters, and Polyamides”. Em: *Plastics in Medical Devices* (2010), pp. 121–173. DOI: 10.1016/B978-0-8155-2027-6.10007-8. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-8155-2027-6.10007-8>.

- [31] F. Welle. "Twenty years of PET bottle to bottle recycling - An overview". Em: *Resources, Conservation and Recycling* 55.11 (2011), pp. 865–875. ISSN: 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.04.009. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.04.009>.
- [32] P. Franciszczak, E. Piesowicz e K. Kalniņš. "Manufacturing and properties of r-PETG/PET fibre composite – Novel approach for recycling of PETG plastic scrap into engineering compound for injection moulding". Em: *Composites Part B: Engineering* 154.September (2018), pp. 430–438. ISSN: 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.023.
- [33] L. W. McKeen. *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers || Polyimides*. 2010, pp. 149–173. DOI: 10.1016/B978-0-08-096450-8.00007-7.
- [34] G. H. Melton, E. N. Peters e R. K. Arisman. *2 Engineering Thermoplastics*. Elsevier Ltd, 2011, pp. 7–21. DOI: 10.1016/B978-1-4377-3514-7.10002-9. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10002-9>.
- [35] PEI ou ULTEM. URL: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/products/tecapei-natural>.
- [36] Comercialização de bocais. URL: [https://pt.dhgate.com/product/510-810-ultem-pei-drip-tip-hot-selling-cheap/414103364.html#redirect\\_detail=WAP2PC](https://pt.dhgate.com/product/510-810-ultem-pei-drip-tip-hot-selling-cheap/414103364.html#redirect_detail=WAP2PC).
- [37] <http://www.fluorocarbon.co.uk>.
- [38] *Element and Processing* 6.1. Vol. 18. 2011. ISBN: 9780123750495. DOI: 10.1016/B978-0-12-375049-5.00006-2.
- [39] D. b. Aetna Plastics (Ensinger). "TECAPEEK natural - Stock Shapes". Em: *Paper distributed by Aetna Plastics* (2018).
- [40] Peek. URL: <https://www.plastecno.com.br/produtos/peek.html>.
- [41] P. Miguel e D. O. Fernandes. "Caracterização térmica de painéis sanduíche em polímero reforçado com fibra de vidro ( GFRP ) Engenharia Civil". Em: *Tese de mestrado. FCT-UNL* (2014).
- [42] W. N. dos Santos, R. Gregório Filho, P. Mummery e A. Wallwork. "Propriedades térmicas de polímeros por métodos transientes de troca de calor". Em: *Polímeros* 13.4 (dez. de 2003), pp. 265–269. ISSN: 1678-5169. DOI: 10.1590/s0104-14282003000400011.
- [43] Fluke. URL: <https://www.aresagante.pt/multimetros/fluke/fluke-287-289-multimetros-true-rms-de-registo/>.
- [44] Ender3. URL: <https://www.reprap.pt/impressora/creality-3d-ender-3>.
- [45] C. Reeves e K. Gremillion. "Excellence in Engineering Simulation Executive Editor". Em: *ANSYS - Advantage - Academic VIII* (1 2014).





**ANEXOS**

## Anexo A

[illegible]



Anexo B

Notes:

Ø50mm

Ø50±0,5 mm

5mm

Ø50mm

A

B

REV

DESCRIPTION

INCORP BY

DATE

CHECKED

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

201

202

203

204

205

206

207

208

209

210

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

222

223

224

225

226

227

228

229

230

231

232

233

234

235

236

237

238

239

240

241

242

243

244

245

246

247

248

249

250

251

252

253

254

255

256

257

258

259

260

261

262

263

264

265

266

267

268

269

270

271

272

273

274

275

276

277

278

279

280

281

282

283

284

285

286

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

301

302

303

304

305

306

307

308

309

310

311

312

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

326

327

328

329

330

331

332

333

334

335

336

337

338

339

340

341

342

343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

353

354

355

356

357

358

359

360

361

362

363

364

365

366

367

368

369

370

371

372

373

374

375

376

377

378

379

380

381

382

383

384

385

386

387

388

389

390

391

392

393

394

395

396

397

398

399

400

401

402

403

404

405

406

407

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

418

419

420

421

422

423

424

425

426

427

428

429

430

431

432

433

434

435

436

437

438

439

440

441

442

443

444

445

446

447

448

449

450

451

452

453

454

455

456

457

458

459

460

461

462

463

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

482

483

484

485

486

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

502

503

504

505

506

507

508

509

510

511

512

513

514

515

516

517

518

519

520

521

522

523

524

525

526

527

528

529

530

531

532

533

534

535

536

537

538

539

540

541

542

543

544

545

546

547

548

549

550

551

552

553

554

555

556

557

558

559

560

561

562

563

564

565

566

567

568

569

570

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

582

583

584

585

586

587

588

589

590

591

592

593

594

595

596

597

598

599

600

601

602

603

604

605

606

607

608

609

610

611

612

613

614

615

616

617

618

619

620

621

622

623

624

625

626

627

628

629

630

631

632

633

634

635

636

637

638

639

640

641

642

643

644

645

646

647

648

649

650

651

652

653

654

655

656

657

658

659

660

661

662

663

664

665

666

667

668

669

670

671

672

673

674

675

676

677

678

679

680

681

682

683

684

685

686

687

688

689

690

691

692

693

694

695

696

697

698

699

700

701

702

703

704

705

706

707

708

709

710

711

712

713

714

715

716

717

718

719

720

721

722

723

724

725

726

727

728

729

730

731

732

733

734

735

736

737

738

739

740

741

742

743

744

745

746

747

748

749

750

751

752

753

754

755

756

757

758

759

760

761

762

763

764

765

766

767

768

769

770

771

772

773

774

775

776

777

778

779

780

781

782

783

784

785

786

787

788

789

790

791

792

793

794

795

796

797

798

799

800

801

802

803

804

805

806

807

808

809

810

811

812

813

814

815

816

817

818

819

820

821

822

823

824

825

826

827

828

829

830

831

832

833

834

835

836

837

838

839

840

841

842

843

844

845

846

847

848

849

850

851

852

853

854

855

856

857

858

859

860

861

862

863

864

865

866

867

868

869

870

871

872

873

874

875

876

877

878

879

880

881

882

883

884

885

886

887

888

889

890

891

892

893

894

895

896

897

898

899

900

901

902

903

904

905

906

907

908

909

910

911

912

913

914

915

916

917

918

919

920

921

922

923

924

925

926

927

928

929

930

931

932

933

934

935

936

937

938

939

940

941

942

943

944

945

946

947

948

949

950

951

952

953

954

955

956

957

958

959

960

961

962

963

964

965

966

967

968

969

970

971

972

973

974

975

976

977

978

979

980

981

982

983

984

985

986

987

988

989

990

991

992

993

994

995

996

997

998

999

1000

1001

1002

1003

1004

1005

1006

1007

1008

1009

1010

1011

1012

1013

1014

1015

1016

1017

1018

1019

1020

1021

1022

1023

1024

1025

1026

1027

1028

1029

1030

1031

1032

1033

1034

1035

1036

1037

1038

1039

1040

1041

1042

1043

1044

1045

1046

1047

1048

1049

1050

1051

1052

1053

1054

1055

1056

1057

1058

1059

1060

1061

1062

1063

1064

1065

1066

1067

1068

1069

1070

1071

1072

1073

1074

1075

1076

1077

1078

1079

1080

1081

1082

1083

1084

1085

1086

1087

1088

1089

1090

1091

1092

1093

1094

1095

1096

1097

1098

1099

1100

1101

1102

1103

1104

1105

1106

1107

1108

1109

1110

1111

1112

1113

1114

1115

1116

1117

1118

1119

1120

1121

1122

1123

1124

1125

1126

1127

1128

1129

1130

1131

1132

1133

1134

1135

1136

1137

1138

1139

1140

1141

1142

1143

1144

1145

1146

1147

1148

1149

1150

1151

1152

1153

1154

1155

1156

1157

1158

1159

1160

1161

1162

1163

1164

1165

1166

1167

1168

1169

1170

1171

1172

1173

1174

1175

1176

1177

1178

1179

1180

1181

1182

1183

1184

1185

1186

1187

1188

1189

1190

1191

1192

1193

1194

1195

1196

1197

1198

1199

1200

1201

1202

1203

1204

1205

1206

1207

1208

1209

1210

1211

1212

1213

1214

1215

1216

1217

1218

1219

1220

1221

1222

1223

1224

1225

1226

1227

1228

1229

1230

1231

1232

1233

1234

1235

1236

1237

1238

1239

1240

1241

1242

1243

1244

1245

1246

1247

1248

1249

1250

1251

1252

1253

1254

1255

1256

1257

1258

1259

1260

1261

1262

1263

1264

1265

1266

1267

1268

1269

1270

1271

1272

1273

1274

1275

1276

1277

1278

1279

1280

1281

1282

1283

1284

1285

1286

1287

1288

1289

1290

1291

1292

1293

1294

1295

1296

1297

1298

1299

1300

1301

1302

1303

1304

1305

1306

1307

1308

1309

1310

1311

1312

1313

1314

1315

1316

1317

1318

1319

1320

1321

1322

1323

1324

1325

1326

1327

1328

1329

1330

1331

1332

1333

1334

1335

1336

1337

1338

1339

1340

1341

1342

1343

1344

1345

1346

1347

1348

1349

1350

1351

1352

1353

1354

1355

1356

1357

1358

1359

1360

1361

1362

1363

1364

1365

1366

1367

1368

1369

1370

1371

1372

1373

1374

1375

1376

1377

1378

1379

1380

1381

1382

1383

1384

1385

1386

1387

1388

1389

1390

1391

1392

1393

1394

1395

1396

1397

1398

1399

1400

1401

1402

1403

1404

1405

1406

1407

1408

1409

1410

1411

1412

1413

1414

1415

1416

1417

1418

1419

1420

1421

1422

1423

1424

1425

1426

1427

1428

1429

1430

1431

1432

1433

1434

1435

1436

1437

1438

1439

1440

1441

1442

1443

1444

1445

1446

1447

1448

1449

1450

1451

1452

1453

1454

1455

1456

1457

1458

1459

1460

1461

1462

1463

1464

1465

1466

1467

1468

1469

1470

1471

1472

1473

1474

1475

1476

1477

1478

1479

148

## Anexo C

**NOTES:**

Ø75mm

Ø77±0,8 mm

Ø100mm

12mm

4mm

5mm

77mm

**REVISION HISTORY**

REV	DESCRIPTION	INCORP BY	DATE	CHECKED

**PARTS LIST**

QTY	RECD	ITEM NO.	PART OR IDENTIFYING NO.	NOMENCLATURE OR DESCRIPTION
2	1			

**THIRD ANGLE PROJECTION**

CONTRACT NO.

MATERIAL

FINISH

TREATMENT

NEXT ASSY

USED ON

APPLICATION

**APPROVALS**

INIT	APPROVALS	DATE	INIT	APPROVALS	DATE

**SIZE**

**CAGE CODE**

**DWG NO.**

**REV**

**SCALE**

**SHEET**

## Anexo D

[illegible]

## Anexo E

Technical drawing of a cylindrical part with three views: front, top, and side.

**Front View:** Shows a cylinder with a diameter of  $\varnothing 75\text{mm}$  and a height of  $12\text{mm}$ . A section line A-A is indicated.

**Top View:** Shows a circular flange with an outer diameter of  $\varnothing 100\text{mm}$  and an inner diameter of  $\varnothing 77\text{mm}$ . A section line B-B is indicated.

**Side View:** Shows a cross-section of the flange with a thickness of  $4\text{mm}$  and a central hole with a diameter of  $\varnothing 77\text{mm}$ . The hole has a depth of  $4\text{mm}$  and a total height of  $5\text{mm}$ .

**Notes:**

- al, cylindrical face, or a datum target.

**Table 1: Revision History**

REV	DESCRIPTION	INCORP BY	DATE	CHECKED

**Table 2: Parts List**

QTY	ITEM NO.	PART OR IDENTIFYING NO.	NAME/CLATURE OR DESCRIPTION

**Table 3: Third Angle Projection**

CONTRACT NO.	MATERIAL	FINISH	TREATMENT	SIMILAR TO

**Table 4: Application**

NEXT ASSY	USED ON	APPLICATION

**Table 5: Scale and Sheet Information**

SIZE	CAGE CODE	DWG NO.	REV
B			

**Table 6: Sheet Information**

SCALE	SHEET